UNIVERSITE DE GRENOBLE I
Année 1972
N° d'enregistrement au C.N.R.S.
A.O. 7282

THESE présentée pour
obtenir le grade de
DOCTEUR INGENIEUR
par
ROBERT THEROND
ingénieur ENSG

RECHERCHE SUR L'ETANCHEITE DES LACS DE BARRAGES EN PAYS KARSTIQUE

soutenue le 9 juin 1972
devant la commission d'examen
Président: M. BARBIER R.
Examinateur: M. MICHEL R.
Invités: M. GEZE B.
M. CABANIUS J.

UNIVERSITE DE GRENOBLE I

Année 1972

N° d'enregistrement
au C.N.R.S. : A.O. 7282

THESE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR-INGENIEUR

par

Robert THEROND

Ingénieur E.N.S.G.

RECHERCHE SUR L'ETANCHEITE DES LACS DE BARRAGES EN PAYS KARSTIQUE

Soutenue publiquement le 9 juin 1972 devant la Commission d'Examen

MM.	R. BARBIER	Président
	R. MICHEL	Examinateurs
	B. GEZE	Invités
	J. CABANIUS	

Cette thèse est publiée aux éditions EYROLLES - Paris, Collection du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou - 1973.

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

LISTE DES PROFESSEURS

Président : Monsieur Michel SOUTIF
Vice-Président : Monsieur Gabriel CAU

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ANGLES D'AURIAC Paul	Mécanique des fluides
	ARNAUD Georges	Clinique des maladies infectieuses
	ARNAUD Paul	Chimie
	AUBERT Guy	Physique
	AYANT Yves	Physique approfondie
Mme	BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM.	BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale
	BARBIER Reynold	Géologie appliquée
	BARJON Robert	Physique nucléaire
	BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
	BARRA Jean-René	Statistiques
	BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
	BENOIT Jean	Radioélectricité
	BERNARD Alain	Mathématiques Pures
	BESSON Jean	Electrochimie
	BEZES Henri	Chirurgie générale
	BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
	BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
	BONNET Georges	Electrotechnique
	BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
	BONNET-EYMARD Joseph	Pathologie médicale
	BONNIER Etienne	Electrochimie Electrométallurgie
	BOUCHERLE André	Chimie et Toxicologie
	BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
	BRAVARD Yves	Géographie
	BRISSONNEAU Pierre	Physique du Solide
	BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
	CABANAC Jean	Pathologie chirurgicale
	CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologie
	CALAS François	Anatomie
	CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
	CAU Gabriel	Médecine légale et Toxicologie
	CAUQUIS Georges	Chimie organique
	CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
	CHARACHON Robert	Oto-Rhino-Laryngologie
	CHATEAU Robert	Thérapeutique
	CHENE Marcel	Chimie papetière
	COEUR André	Pharmacie chimique
	CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
	COUDERC Pierre	Anatomie Pathologique
	CRAYA Antoine	Mécanique
Mme	DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM.	DEBELMAS Jacques	Géologie générale

MM.	DEGRANGE Charles	Zoologie
	DESSAUX Georges	Physiologie animale
	DODU Jacques	Mécanique appliquée
	DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
	DREYFUS Bernard	Thermodynamique
	DUCROS Pierre	Cristallographie
	DUGOLS Pierre	Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie
	FAU René	Clinique neuro-psychiatrique
	FELICI Noël	Electrostatique
	GAGNAIRE Didier	Chimie physique
	GALLISSOT François	Mathématiques Pures
	GALVANI Octave	Mathématiques Pures
	GASTINEL Noël	Analyse numérique
	GERBER Robert	Mathématiques Pures
	GIRAUD Pierre	Géologie
	KLEIN Joseph	Mathématiques Pures
Mme	KOFLER Lucie	Botanique et Physiologie végétale
MM.	KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques Pures
	KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
	KUNTZMANN Jean	Mathématiques Appliquées
	LACAZE Albert	Thermodynamique
	LACHARME Jean	Biologie végétale
	LATREILLE René	Chirurgie générale
	LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
	LAURENT Pierre	Mathématiques Appliquées
	LEDRU Jean	Clinique médicale B
	LLIBOUTRY Louis	Géophysique
	LOUP Jean	Géographie
Mle	LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
MM.	MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
	MALINAS Yves	Clinique obstétricale
	MARTIN-NOEL Pierre	Seméiologie médicale
	MASSEPORT Jean	Géographie
	MAZARE Yves	Clinique médicale A
	MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
	MOURIQUAND Claude	Histologie
	MOUSSA André	Chimie nucléaire
	NEEL Louis	Physique du Solide
	OZENDA Paul	Botanique
	PAUTHENET René	Electrotechnique
	PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
	PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
	PERRET René	Servomécanismes
	PILLET Emile	Physique industrielle
	RASSAT André	Chimie systématique
	RENARD Michel	Thermodynamique
	REULOS René	Physique industrielle
	RINALDI Renaud	Physique
	ROGET Jean	Clinique de pédiatrie et de puériculture
	SANTON Lucien	Mécanique
	SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
	SENGEL Philippe	Zoologie
	SILBERT Robert	Mécanique des fluides
	SOUTIF Michel	Physique générale
	TANCHE Maurice	Physiologie
	TRAYNARD Philippe	Chimie générale
	VAILLAND François	Zoologie
	VALENTIN Jacques	Physique Nucléaire

M.	VAUQUOIS Bernard	Calcul électronique
Mme	VERAIN Alice	Pharmacie galénique
M.	VERAIN André	Physique
Mme	VEYRET Germaine	Géographie
MM.	VEYRET Paul	Géographie
	VIGNAIS Pierre	Biochimie médicale
	YOCCOZ Jean	Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	BULLEMER Bernhard	Physique
	HANO JUN-ICHI	Mathématiques Pures
	STEPHENS Michaël	Mathématiques Appliquées

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M.	BEAUDOING André	Pédiatrie
Mme	BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM.	BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques Appliquées
	BIAREZ Jean-Pierre	Mécanique
	BONNETAIN Lucien	Chimie minérale
Mme	BONNIER Jane	Chimie générale
MM.	CARLIER Georges	Biologie végétale
	COHEN Joseph	Electrotechnique
	COUMES André	Radioélectricité
	DEPASSEL Roger	Mécanique des Fluides
	DEPORTES Charles	Chimie minérale
	DESRE Pierre	Métallurgie
	GAUTHIER Yves	Sciences biologiques
	GEINDRE Michel	Electroradiologie
	GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
	GIDON Paul	Géologie et Minéralogie
	GLENAT René	Chimie organique
	HACQUES Gérard	Calcul numérique
	JANIN Bernard	Géographie
Mme	KAHANE Josette	Physique
MM.	MULLER Jean-Michel	Thérapeutique
	PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et minéralogie
	POULOUJADOFF Michel	Electrotechnique
	REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
	REVOL Michel	Urologie
	REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
	ROBERT André	Chimie papetière
	SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
	SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
	SIBILLE Robert	Construction Mécanique
	SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme	SOUTIF Jeanne	Physique générale

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

Mle	AGNIUS-DELORD Claudine	Physique pharmaceutique
	ALARY Josette	Chimie analytique
MM.	AMBLARD Pierre	Dermatologie
	AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie
	ARMAND Yves	Chimie
	BEGUIN Claude	Chimie organique
	BELORIZKY Elie	Physique
	BENZAKEN Claude	Mathématiques Appliquées
	BILLET Jean	Géographie
	BLIMAN Samuel	Electronique (EIE)
	BLOCH Daniel	Electrotechnique
Mme	BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM.	BOUCHET Yves	Anatomie
	BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques Appliquées
	BOUVARD Maurice	Mécanique des Fluides
	BRIERE Georges	Physique expérimentale
	BRODEAU François	Mathématiques (I.U.T. "B")
	BRUGEL Lucien	Energétique
	BUISSON Roger	Physique
	BUTEL Jean	Orthopédie
	CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
	CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
	CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
	CHIBON Pierre	Biologie animale
	COHEN-ADDAD Jean-Pierre	Spectrométrie physique
	COLOMB Maurice	Biochimie médicale
	CONTE René	Physique
	CROUZET Guy	Radiologie
	DURAND Francis	Métallurgie
	DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme	ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM.	FAURE Jacques	Médecine légale
	GAVEND Michel	Pharmacologie
	GENSAC Pierre	Botanique
	GIDON Maurice	Géologie
	GRIFFITHS Michaël	Mathématiques Appliquées
	GROULADE Joseph	Biochimie médicale
	HOLLARD Daniel	Hématologie
	HUGONOT Robert	Hygiène et Médecine préventive
	IDELMAN Simon	Physiologie animale
	IVANES Marcel	Electricité
	JALBERT Pierre	Histologie
	JOLY Jean-René	Mathématiques Pures
	JOUBERT Jean-Claude	Physique du Solide
	JULLIEN Pierre	Mathématiques Pures
	KAHANE André	Physique générale
	KUHN Gérard	Physique
Mme	LAJZEROWICZ Jeannine	Physique

MM.	LAJZEROWICZ Joseph	Physique
	LANCIA Roland	Physique atomique
	LE JUNTER Noël	Electronique
	LEROY Philippe	Mathématiques
	LOISEAUX Jean-Marie	Physique Nucléaire
	LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique Nucléaire
	LUU DUC Cuong	Chimie Organique
	MACHE Régis	Physiologie végétale
	MAGNIN Robert	Hygiène et Médecine préventive
	MARECHAL Jean	Mécanique
	MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)
	MAYNARD Roger	Physique du Solide
	MICHOULIER Jean	Physique (I.U.T. "A")
	MICOUD Max	Maladies infectieuses
	MOREAU René	Hydraulique (INP)
	NEGRE Robert	Mécanique
	PARAMELLE Bernard	Pneumologie
	PECCOUD François	Analyse (IUT B)
	PEFFEN René	Métallurgie
	PELMONT Jean	Physiologie animale
	PERRET Jean	Neurologie
	PERRIN Louis	Pathologie expérimentale
	PFISTER Jean-Claude	Physique du Solide
	PHELIP Xavier	Rhumatologie
Mle	PIERY Yvette	Biologie animale
MM.	RACHAIL Michel	Médecine interne
	RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
	RICHARD Lucien	Botanique
Mme	RINAUDO Marguerite	Chimie macromoléculaire
MM.	ROMIER Guy	Mathématiques (IUT B)
	ROUGEMONT (DE) Jacques	Neuro-Chirurgie
	SHAN Jean-Claude	Chimie générale
	STIEGLITZ Paul	Anesthésiologie
	STOEBNER Pierre	Anatomie pathologique
	VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques Appliquées
	VEILLON Gérard	Mathématiques Appliquées (INP)
	VIALON Pierre	Géologie
	VOOG Robert	Médecine interne
	VROUSSOS Constantin	Radiologie
	ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	BOUDOURIS Georges	Radioélectricité
	CHEEKE John	Thermodynamique
	GOLDSCHMIDT Hubert	Mathématiques
	SIDNEY STUARD	Mathématiques Pures
	YACOUD Mahmoud	Médecine légale

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

Mme	BERIEL Hélène	Physiologie
Mme	RENAUDET Jacqueline	Microbiologie

"Tout auteur ... animé d'un sens social élevé se doit, du moins tant qu'il n'a pas atteint le seuil de la vieillesse, de remercier les membres de sa famille pour la patience dont ils ont fait preuve ... c'est avec joie que je me plie à cette coutume.
Je puis donner l'assurance que ma femme et mes trois enfants ont très remarquablement survécu au surmenage imposé par mon labeur ..."

JOHN KENNETH GALBRAITH
"Le nouvel Etat industriel"
Avant-propos

Avant_propos

Si ce travail a quelque valeur, il est juste que je remercie ceux qui m'ont permis de le mener à bien ; dans le cas contraire, qu'ils veuillent bien m'excuser de les compromettre.

Il me faut en premier lieu citer ELECTRICITE DE FRANCE. Par la place accordée à la Géologie au sein de la DIRECTION DE L'EQUIPEMENT, le géologue d'ELECTRICITE DE FRANCE bénéficie d'une situation privilégiée pour aborder les problèmes géologiques liés aux grands ouvrages. Collaborateur à temps plein et à part entière du Maître d'Oeuvre, il est associé et participe à toutes les étapes de la vie des grands ouvrages - prospection, reconnaissances, construction, mise en service, surveillance. Témoin des réalisations en cours, il a, en outre, à sa disposition, l'expérience et les enseignements acquis depuis plus de 25 ans par ELECTRICITE DE FRANCE sur plus d'une centaine d'aménagements dont les archives constituent pour lui une véritable "banque de données". Enfin, en raison de la notoriété acquise par E.D.F., l'accès aux ouvrages et aux documents étrangers lui est facilité, ce qui m'a permis, en particulier, de connaître et de traiter plusieurs ouvrages situés hors de France.

En rappelant en quelques lignes les conditions dans lesquelles ce travail a pu être entrepris et réalisé, j'ai voulu et je souhaite avoir su montrer combien il doit à ELECTRICITE DE FRANCE.

Je suis particulièrement heureux d'avoir à remercier Monsieur le Professeur BARBIER, et en sa personne l'Institut Dolomieu, pour l'aide et l'accueil que j'ai reçus à l'Université de Grenoble durant toute la période où j'ai poursuivi cette étude.

Quand j'ai parlé pour la première fois de ce projet de thèse à Monsieur BARBIER en exprimant le souhait qu'il veuille bien diriger mon travail, Monsieur BARBIER a non seulement accepté, malgré ses nombreuses occupations, mais il m'a immédiatement invité à utiliser ses nombreux travaux sur les sites de barrages en pays calcaire.

La bibliographie des aménagements présentés dans la deuxième partie montre mieux que toutes phrases l'importance des renseignements que Monsieur BARBIER mettait à ma disposition ; le lecteur attentif pourra en effet constater que rares sont les aménagements cités qu'il n'a pas eu l'occasion d'étudier ou de contrôler. Je voudrais donc qu'il trouve ici, pour toute l'aide qu'il m'a apportée, l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens également à rendre dans ce texte hommage aux SPELEOLOGUES. Le karst présente en effet l'originalité d'être à la fois terrain de jeu et objet d'étude. Si certains spéléologues "travaillent" contre la montre, nombreux sont ceux qui ramènent de leurs explorations des informations multiples et de grande valeur. Seuls, ceux qui ont fait, sur quelques centaines de mètres, la topographie d'un réseau karstique un tant soit peu boueux et humide, se représentent, pour ne citer qu'un exemple, le travail qui a été nécessaire pour mener à bien le lever topographique des 110 km de galeries du réseau du HÖLLÖCH. De même, je voudrais mentionner l'intérêt et l'importance des explorations réalisées dans les réseaux noyés et au passage saluer mes amis du G.E.P.S. de Marseille pour le travail qu'ils ont accompli à Fontaine L'Evêque. La plongée, discipline récente, dangereuse si elle ne s'accompagne pas d'une rigueur totale dans la préparation et dans la pratique, a permis en effet, pour la première fois, d'avoir une vue directe sur toute une partie essentielle du réseau karstique qui n'était jusqu'alors connue que sous ses formes fossiles.

Enfin, je dois remercier sincèrement, d'une part, mes amis Henri PALOC et Philippe RENAULT qui ont bien voulu mettre à ma disposition leur connaissance du karst en relisant et en corrigeant la première partie de ce travail, et d'autre part Rosine AUCHER, Claude BORDET et Pierre DUFFAUT qui m'ont aidé à mettre au point le manuscrit définitif. Quant à la dernière opération, qui était de transformer ce manuscrit définitif mais indéchiffrable, en un texte imprimé, elle a été menée à bien, dans les brefs délais prévus, par Mademoiselle COTREL, secrétaire à la Division Géologie et Géotechnique de la Direction de l'Equipement. Pour sa compétence et sa bonne humeur, qu'elle accepte ici mes remerciements admiratifs.

Rambouillet, le 1er mai 1972

But et méthode de cette étude

La recherche d'une méthode permettant de porter un jugement sur l'étanchéité d'une retenue projetée dans une région karstique, a été entreprise à partir de l'idée suivante :

Si l'étude comparée des contextes géologique, hydrogéologique et karstique du plus grand nombre possible de retenues déjà réalisées permet de mettre en évidence que l'étanchéité (ou la non-étanchéité) d'une retenue peut être mise en liaison avec l'absence ou la présence de certains paramètres naturels, il doit être alors possible, après avoir recherché ces paramètres, de porter un jugement sur l'importance du risque de fuite pour une retenue non encore mise en eau.

Cette méthode n'a donc pas pour ambition de démontrer l'étanchéité d'une retenue mais de situer une retenue projetée par rapport à des retenues déjà mises en eau.

Pour pouvoir effectuer les comparaisons, il faut être en mesure de définir les différentes retenues à l'aide de paramètres significatifs par rapport à la karstification. La recherche de ces paramètres est donc préalable à l'étude comparée des retenues.

C'est pourquoi, le plan adopté est le suivant :

- 1ère partie : le milieu karstique ;
- 2ème partie : les retenues, monographies ;
- 3ème partie : bilans et synthèse.

Dans la première partie, les principales caractéristiques du milieu karstique sont définies, compte tenu des observations rassemblées et des expériences réalisées, tant par les spéléologues que par les karstologues.

Dans la deuxième partie, le cadre naturel de 16 retenues est analysé en s'appuyant sur les paramètres définis dans la première partie. Chaque retenue fait l'objet d'une monographie.

Dans la troisième partie, enfin, l'étude comparée des retenues étanches et des retenues non-étanches permet de mettre en évidence l'association systématique ou fréquente de certains caractères avec les fuites ou l'absence de fuites.

Ce bilan permet également de mettre en lumière les problèmes actuellement sans solution, posés par les retenues en pays calcaire.

- Choix des retenues étudiées

Ce travail fut entrepris dans le cadre des études géologiques générales des barrages de GREOUX : chapitre 12, QUINSON : chapitre 16, et plus particulièrement SAINTE CROIX : chapitre 17.

Les autres ouvrages ont été sélectionnés pour des raisons diverses :

- *VOUGLANS est un ouvrage récent de grande hauteur construit et mis en eau en même temps que GREOUX ;*
- *CHAUDANNE, CASTILLON, BOUVANTE, CHARMINE-MOUX sont des ouvrages plus anciens exploités par E.D.F. et situés dans les Alpes Françaises ;*
- *KARAOUN au Liban est un ouvrage dont l'étude et la réalisation ont été menées à bien par E.D.F., à la même époque que GREOUX ;*
- *Le barrage du NEBAANA et son intérêt ont été découverts au cours d'une mission hydrogéologique destinée à localiser les zones de fuite ;*
- *Le barrage de CEYRAC et le projet de CONQUEYRAC sont des barrages construits récemment ou projetés dans une région particulièrement karstique ;*
- *Enfin, les ouvrages espagnols, CANELLES, CAMARASA, MONTEJAQUE, sont, pour deux d'entre eux, des "classiques" ; quant à CANELLES, il représente un des plus grands ouvrages construits dans une région profondément karstifiée.*

Il est bien évident que ce choix a été influencé par la situation géographique des retenues ; la possibilité de visiter les sites et d'avoir accès aux documents a été également un facteur de sélection. Ce travail a été, en effet, dans sa plus grande partie, subordonné aux impératifs des affaires en cours.

Pour ces diverses raisons, il a donc été nécessaire de préciser, dans le texte, la limite de certaines conclusions pour éviter que des généralisations trop hâtives ne puissent être échafaudées à tort.

On peut penser, enfin, que des conclusions appuyées sur l'analyse d'exemples plus nombreux auraient eu une valeur plus générale - c'est exact. Mais il était nécessaire de savoir limiter ce travail dans le temps ; le nombre de cas étudiés n'aurait donc pu être augmenté qu'en analysant d'une façon plus sommaire chaque exemple. Cette possibilité a été envisagée mais il s'est avéré qu'il n'était pas possible de dégager les points communs ou l'originalité des projets sans pousser l'analyse à un certain niveau de précision.

La deuxième partie est une suite de monographies qui ont été écrites de manière à pouvoir être lues indépendamment les unes des autres (1). Elle pourraît être considérée, dans une certaine mesure, comme une partie analytique annexe. L'introduction de la troisième partie est un tableau récapitulatif qui résume la deuxième partie, afin que la lecture des première et troisième parties puisse être faite à la suite, sans qu'il soit nécessaire de lire en totalité la deuxième partie.

(1) Exception faite de quelques renvois entre chapitres concernant la karstification régionale, ce procédé permettant d'éviter les répétitions.

° ° °

OBJECTIVES AND METHOD

Research into a method that could be used to appraise the watertightness of future storage reservoirs in karstic areas was based on the following idea:

If it could be shown from comparison of the geological, hydrogeological and karst contexts of as many existing reservoirs as possible that their watertightness (or lack of it) can be linked with the absence or presence of certain natural parameters, it should then be possible, once these parameters have been identified, to estimate the risk of leakage from reservoirs yet to be filled.

This method therefore does not aim to prove that a planned reservoir will be watertight but only to situate it in relation to others that have already been impounded.

A prior condition before embarking on the comparative study proper is to be able to describe the reservoirs with a set of significant karstification parameters, and the therefore have to be found first.

The following is accordingly split up into three sections, as follows :

- Part 1 : Karstic environment
- Part 2 : Reservoirs, monographs
- Part 3 : Listings and synthesis.

Part 1 defines the main characteristics of the karst using the past observations and experience of speleologists and karstologists.

Part 2 is an analysis of the natural context at 16 reservoirs based on the parameters described in Part 1. Each reservoir is dealt with in a separate monograph.

Lastly, in Part 3, a comparative study of watertight and non-watertight reservoirs reveals the systematic or at least frequent association of certain characteristics with leakage or its absence.

These listings also highlight the as yet unsolved problems connected with reservoirs in limestone areas.

Je tiens à remercier ici le BUREAU d'INGENIEURS CONSEILS, COYNE & BELLIER (PARIS) et en particulier M. SCHADWIK pour leur collaboration à la rédaction de la version anglaise de tous les résumés.

Table des matières

Pages

AVANT-PROPOS I

BUT ET METHODE DE CETTE ETUDE VII

TABLE DES MATIERES XI

LISTE DES FIGURES XVII

LISTE DES PHOTOGRAPHIES XX

INDEX GEOGRAPHIQUE XXII

BIBLIOGRAPHIE XXVI

1ère PARTIE - LE MILIEU KARSTIQUE

INTRODUCTION 3

CHAPITRE 1 - Les indices karstiques - Fréquence, importance et signification des indices karstiques dans une région calcaire..... 7
1 - Les inventaires 9
2 - Commentaires - Bilans 12
3 - Conclusions 12

CHAPITRE 2 - Le réseau karstique 13
1 - Définition - Exemples 15
2 - Schéma d'un réseau 19
2.1. La zone d'absorption..... 20
2.2. La zone de transfert vertical 25
2.3. La zone d'écoulement horizontal 27
3 - Modèle tri-dimensionnel d'un réseau 29
4 - Complexité des cas réels - Intérêt des explorations 31

CHAPITRE 3 - Fonctionnement du réseau karstique 35
1 - Les apports 37
1.1. Le problème des bassins versants 37
1.2. Les pluies 38
1.3. Les pertes de rivière 38
1.4. La neige et la glace 40
2 - Caractéristiques du régime des eaux karstiques 40
2.1. Les observations 40
2.2. Exemples de réseaux 45
2.3. Synthèse 47
3 - Fonctionnement théorique du réseau karstique 48
3.1. Etude du régime 49
3.2. Les cas réels 53
3.3. Les débits d'étiage 58
3.4. Les réserves karstiques 60
3.5. Perméabilité orientée du massif calcaire 64

Dans cette édition les pages III, IV, V et VI n'existent pas.

Pages

CHAPITRE 4 - Morphologie des vides karstiques 65
1 - Les cavités pénétrables 67
1.1. Le "karst de joints" 67
1.2. Le "karst de fissures" 68
1.3. Localisation des "karsts de joints et de fissures" 68
1.4. Les galeries "gigantesques" et les salles 69
1.5. Limites des cavités explorables 70
2 - Les cavités karstiques impénétrables 70
3 - Pourcentage de vides du massif calcaire 72

CHAPITRE 5 - Genèse et évolution du karst 75
1 - Les mécanismes 78
2 - La dissolution 78
3 - L'érosion mécanique par les eaux courantes 80
4 - Le concrétionnement 82
5 - Les éboulements 83
6 - Les colmatages et décolmatages 84
7 - Commentaires et conclusions 87

CHAPITRE 6 - Rôle du contexte géologique - Influence des caractéristiques géologiques sur l'établissement d'un réseau 89
1 - Rôle de la composition pétrographique de la roche 91
2 - Rôle de la lithologie 91
3 - Rôle de la structure géologique 92
4 - Nature des écrans étanches 93
5 - Rôle des failles 93
6 - Complexité de la karstification d'un massif 94

CONCLUSION - Nature du massif karstifié 96

PHOTOS numérotées de 1 à 20

2ème PARTIE - LES RETENUES - MONOGRAPHIES

PLAN 115

CHAPITRE 1 - Généralités 117
1 - Liste et localisation géographique des retenues étudiées 119
2 - Ordre de présentation 121
3 - Buts poursuivis - Plan adopté 121
4 - Remarques sur certaines caractéristiques 122
5 - Lignes de fuites - Périmètres de fuite - Surfaces mouillées 122
6 - Les documents dessinés - Echelles - Conventions générales 128

CHAPITRE 2 - La retenue du barrage de CAMARASA (Espagne) 129
1 - Généralités 131
2 - Le cadre naturel 133

Pages

2.1. Morphologie 133
2.2. Géologie 133
2.3. Karstification 137
2.4. Hydrogéologie 137
3 - Mise en eau - Traitement d'étanchement 138
4 - Commentaires - Conclusion 140

CHAPITRE 3 - La retenue du barrage de BOUVANTE (France) 143
1 - Généralités 145
2 - Le cadre naturel 147
2.1. Morphologie 147
2.2. Géologie 147
2.3. La karstification 152
2.4. L'hydrologie et l'hydrogéologie 152
3 - Mise en eau - Bilan - Travaux complémentaires 153
4 - Conclusions - Commentaires 155

CHAPITRE 4 - La retenue du barrage de MONTEJAQUE (Espagne) 157
1 - Généralités 159
2 - Le cadre naturel 161
2.1. Morphologie 161
2.2. Géologie 161
2.3. La karstification 163
2.4. Hydrogéologie 163
3 - Mise en eau - Bilan - Travaux d'étanchement 164
4 - Conclusions - Commentaires 166

CHAPITRE 5 - La retenue du barrage de GENISSIAT (France) 167
1 - Généralités 169
2 - Le cadre naturel 171
2.1. Morphologie 171
2.2. Géologie 171
2.3. La karstification 173
2.4. Hydrogéologie 174
3 - Traitements - Mise en eau - Bilan 176
3.1. Traitements 176
3.2. Mise en eau - Bilan 177
4 - Commentaires - Conclusions 177

CHAPITRE 6 - La retenue du barrage de CHARMINE-MOUX (France) 179
1 - Généralités 181
2 - Le cadre naturel 183
2.1. Morphologie 183
2.2. Géologie 183
2.3. Karstification - Hydrogéologie 185
2.4. Cheminements possibles - Possibilités de fuites .. 187
3 - Traitement - Mise en eau - Bilan 188
4 - Commentaires 190

CHAPITRES 7 ET 8 - Les retenues des barrages de CASTILLON et de LA CHAUDANNE (France) 191

	Pages
CHAPITRE 7 - La retenue du barrage de CASTILLON	193
1 - Généralités	195
2 - Le cadre naturel	199
2.1. Géologie - Lithologie - Morphologie	199
2.2. La karstification locale	204
2.3. Hydrogéologie	204
2.4. Possibilités de fuites - Cheminements possibles .	204
3 - Traitement d'étanchéité - Mise en eau - Bilan	205
CHAPITRE 8 - La retenue du barrage de LA CHAUDANNE	209
1 - Généralités	211
2 - Le cadre naturel	211
2.1. Morphologie et géologie	211
2.2. Hydrogéologie	213
2.3. Hypothèses de fuites - Cheminements possibles ...	213
3 - Travaux d'étanchement - Mise en eau - Bilan	214
CHAPITRE 9 - La retenue du barrage de CANELLES (Espagne)	217
1 - Généralités	219
2 - Le cadre naturel	221
2.1. Géologie	221
2.2. La karstification	227
2.3. Hydrogéologie	227
3 - Traitement d'étanchéité - Mise en eau - Bilan - Travaux complémentaires	229
CHAPITRE 10 - La retenue du barrage de KARAOUN (Liban)	233
1 - Généralités	237
2 - Le cadre naturel régional	239
2.1. Morphologie - Géologie	239
2.2. Le karst et l'hydrogéologie régionale	239
3 - Le cadre naturel (suite) - Le site du barrage et la cuvette	242
3.1. Géologie	243
3.2. La karstification	247
3.3. Hydrogéologie	247
4 - Traitement d'étanchéité - Zones d'absorption et cheminements possibles	250
4.1. Traitement d'étanchéité	250
4.2. Zones d'absorption et cheminements possibles	252
5 - Mises en eau - Bilans	254
CHAPITRE 11 - La retenue du barrage de NEBAANA (Tunisie)	257
1 - Généralités	260
2 - Le cadre naturel	261
2.1. Morphologie et structure	261
2.2. Géologie	265
2.3. La karstification locale	266
2.4. Hydrogéologie - Les risques de fuites	270
3 - Traitement - Mise en eau - Bilan	274
4 - Commentaires	277

Pages

CHAPITRE 12 - La retenue du barrage de GREOUX (France) 279
1 - Généralités 281
2 - Le cadre naturel 283
2.1. Géologie et morphologie 283
2.2. La karstification 288
2.3. Hydrogéologie 290
3 - Traitement - Mise en eau - Bilan 290
4 - Commentaires 293

CHAPITRE 13 - La retenue du barrage de VOUGLANS (France) 295
1 - Généralités 299
2 - Le cadre naturel 301
2.1. Morphologie 301
2.2. Géologie 301
2.3. La karstification locale 303
2.4. Données hydrogéologiques 304
3 - Traitement - Mise en eau - Bilan 305

CHAPITRE 14 - Les retenues des barrages de CEYRAC et de CONQUEYRAC (France) 309
1 - Généralités 315
2 - Le cadre naturel 317
2.1. Géologie 318
2.2. La karstification 318
2.3. L'hydrogéologie 319

CHAPITRE 15a - La retenue du barrage de CEYRAC (France) 323
1 - Généralités 325
2 - Le cadre naturel 325
2.1. Morphologie 325
2.2. Géologie 325
2.3. La karstification locale 326
2.4. Hydrogéologie 327
3 - Traitements d'étanchéité - Mise en eau - Bilan 327

CHAPITRE 15b - La retenue du barrage de CONQUEYRAC (France) 329
1 - Généralités 331
2 - Le cadre naturel 331
2.1. Morphologie 331
2.2. Géologie 331
2.3. La karstification 332
2.4. Hydrogéologie 332
3 - Impressions générales - Commentaires 334

CHAPITRE 16 - La retenue du barrage de QUINSON (France) 335
1 - Généralités 339
2 - Le cadre naturel 340
2.1. Morphologie 340
2.2. Géologie 343
2.3. Karstification 345
2.4. Données hydrogéologiques 345
3 - Traitements - Mise en eau - Bilan 347

Pages

CHAPITRE 17 - La retenue du barrage de SAINTE CROIX (France) 349
1 - Généralités 353
2 - Le cadre naturel 358
2.1. Morphologie 358
2.2. Géologie 359
3 - Risques de fuites - Cheminements possibles 368
4 - Conclusions - Les fuites possibles 371

3ème PARTIE - BILANS ET SYNTHESE

PLAN 375

AVANT-PROPOS 376

INTRODUCTION - Vue d'ensemble des retenues étudiées - Tableau récapitulatif 377

CHAPITRE 1 - Les monographies - Bilans - Essai de classement 382
1 - Les ouvrages 385
2 - Morphologies 385
3 - Structure - Tectonique 390
4 - Lithologie - Pétrographie - Stratigraphie 391
5 - Fracturation 393
6 - Karstification 395
7 - Hydrologie - Hydrogéologie 397
8 - Bilan général 403

CHAPITRES 2 ET 3 - Mises en eau - Bilans - Retenues étanches - Retenues non-étanches 405

CHAPITRE 2 - Les retenues étanches 407

CHAPITRE 3 - Les retenues non-étanches 411
1 - Caractéristiques des fuites 411
2 - Bilans 417

CHAPITRE 4 - Synthèse 418
1 - Nature de la fuite karstique 421
2 - Le risque de fuite - Règles empiriques 422
3 - Aspects spécifiques des traitements d'étanchéité en terrain karstique 430
4 - Piézométrie dans le massif calcaire après remplissage . 433
5 - Caractère artificiel des lacs de barrages en pays karstique 435

CHAPITRE 5 - Conclusions générales 437
1 - Points acquis 439
2 - Problèmes 440
3 - Etude de l'étanchéité d'une retenue en pays karstique . 440
4 - Possibilités et limites des études 444

°
° °

LISTE DES FIGURES

1ère PARTIE

Chapitre 1

pages

figure 1 - Répartition des différents types de cavités dans les séries géologiques du Jura Français..... 8
figure 2 - Tableau résumé de la distribution et de la nature des indices karstiques dans la Région des Grands Causses (Paloc 1971)..... 10

Chapitre 2

figure 3 - Fontaine l'Evêque - localisation du bassin d'alimentation..... 16
figure 4 - Fontaine l'Evêque - coupe du réseau entre la source et le grand aven de Canjuers..... 16
figure 5 - Fontaine l'Evêque - coupe verticale du réseau noyé exploré par plongées à partir de l'émergence..... 17
figure 6 - La Caborne de Menouille - schéma simplifié du réseau, en projection verticale..... 18
figure 7 - Massif calcaire de Baudinard - réseau de surface et drainage souterrain..... 21
figure 8 - Grottes des étangs de Leubot (Jura) - coupe verticale.. 22
figure 9 - Influence de la lithologie sur la morphologie du lapiaz 24
figure 10 - Fontaine de Nîmes - sources de l'Aar - coupe verticale des réseaux noyés..... 28
figure 11 - Le réseau karstique - coupe verticale schématique..... 29
figure 12 - Mammoth Cave U.S.A. - plan du réseau..... 30
figure 13 - Höllöch - Suisse - schéma simplifié du réseau..... 30

Chapitre 3

figure 14 - Pertes du Danube et zone de résurgence..... 39
figure 15 - Fontaine l'Evêque - Fontaine de Vaucluse - hydrogrammes 41
figure 16 - Véritable mise en charge et pseudo mise en charge..... 45
figure 17 - La Caborne de Menouille - circulations pérennes et dispositif de mesure..... 46
figure 18 - Fontaine l'Evêque - schéma du dispositif de fermeture.. 46
figure 19 - Identification des différentes zones du réseau karstique d'après les observations hydrodynamiques..... 47

pages

figure 20 - Schéma de la mise en charge..... 50
figure 21 - Modèle de réseau pour l'étude de l'hydrogramme d'une source karstique..... 52
figure 22 - Exemple d'hydrogramme d'une source karstique - construction de la courbe Qa à partir de la courbe Qe..... 53
figure 23 - Hydrogramme d'une source karstique exemple d'une crue brutale..... 54
figure 24 - Schéma de réseau - longueur relative des différentes zones..... 55
figure 25 - Fontaine l'Evêque - hydrogramme d'une crue de printemps construction de la courbe Qa..... 57
figure 26 - Schéma tridimensionnel du réseau..... 58
figure 27 - Exemples de courbes de décrues - valeur du débit d'étiage..... 59
figure 28 - Hypothèses sur les régimes d'écoulement dans un massif karstique..... 62

Chapitre 5

figure 29 - Importance des différents mécanismes d'érosion dans les diverses zones du réseau karstique..... 79
figure 30 - Possibilité de reprise des dépôts, de transport et de sédimentation, en fonction de la vitesse moyenne du courant..... 82
figure 31 - Effet sur la voûte, du dénoyage rapide d'une galerie artificielle..... 84
figure 32 - Source de Saizenay - coupe verticale du réseau..... 94

2ème PARTIE

Chapitre 1 - Généralités - 10 figures - voir page 117

Chapitre 2 - Camarasa - 5 figures 129

Chapitre 3 - Bouvante - 4 figures 143

Chapitre 4 - Montejacque - 3 figures..... 157

Chapitre 5 - Génissiat - 3 figures..... 167

Chapitre 6 - Charmine-Moux - 4 figures..... 179

Chapitres 7-8 - Castillon - La Chaudanne - 4 figures..... 191

pages

Chapitre 9 - Canelles - 6 figures..... 217

Chapitre 10 - Karaoun - 5 figures..... 233

Chapitre 11 - Nebaana - 5 figures..... 257

Chapitre 12 - Gréoux - 5 figures..... 279

Chapitre 13 - Vouglans - 4 figures..... 295

Chapitres 14-15 - Ceyrac et Conqueyrac - 4 figures..... 309

Chapitre 16 - Quinson - 4 figures..... 335

Chapitre 17 - Sainte Croix - 7 figures..... 349

3ème PARTIE

Introduction

figure 1 - Tableau récapitulatif des 16 retenues étudiées..... 380

Chapitre 1

figure 2 - Principaux caractères de la karstification pour chacune des 16 retenues étudiées..... 398

figure 3 - Tableau récapitulatif des paramètres caractéristiques de chaque retenue étudiée..... 401

figure 4 - Analyse statistique de la fréquence des caractères communs entre les retenues prises 2 à 2..... 402

Chapitre 3

figure 5 - Tableau des principales caractéristiques des fuites.... 412

figure 6 - Importance des fuites en fonction de la hauteur d'eau dans les retenues..... 414

Chapitre 4

figure 7 - Hypothèses sur la piézométrie du massif calcaire après mise en eau de la retenue..... 432

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

1ère PARTIE - LE MILIEU KARSTIQUE

Photo 1 - Le désert de Platé (Alpes calcaires de Haute Savoie) - vue sur le lapiaz

Photo 2 - Le plojé de Suech (Alpes de Haute Provence) - vue générale

Photo 3 - Coupe artificielle (talus de route) dans la zone d'absorption - calcaire stratifié

Photos 4 et 4 bis - Coupe artificielle (talus de route) dans la zone d'absorption - calcaire massif

Photo 5 - Coupe artificielle (talus de route) dans la zone d'absorption - calcaire bicolore

Photo 5 bis - Cryoclastie et karst cutané

Photo 6 - La face Nord du Mont Granier (Savoie) - vue générale

Photos 7 et 7 bis - Karst de joint - Fontaine l'Evêque (Var)

Photo 8 - Karst de joint - Grotte de l'Eglise (Var)

Photo 8 bis - Karst de joint - réseau supérieur de la Caborne de Menouille (Jura)

Photo 9 - Karst de fissure - appui rive droite du site du barrage de Gréoux (Alpes de Haute Provence)

Photo 9 bis - Karst de fissure - réseau actif de Fontaine l'Evêque (Var)

Photo 10 - Karst de fissure - appui rive droite du barrage de Gréoux (Alpes de Haute Provence)

Photo 11 - Karst de fissure - Caborne de Menouille (Jura)

Photo 12 - Conduit karstique dans une série stratifiée - front de carrière (Causses Nord - Montpellierains)

Photo 13 - Cavité avec éboulement (Espagne)

Photo 14 - Cavité avec éboulement de voûte - Grotte du Sergent (vallée de l'Hérault)

Photo 15 - Conduit de joint colmaté avec venue d'eau en calotte Fontaine l'Evêque (Var)

Photo 16 - Conduit de joint avec plancher de calcite - Fontaine l'Evêque (Var)

Photo 17 - Importance, nature du remplissage et reprise d'érosion dans un conduit de joint - Fontaine l'Evêque (Var)

Photo 18 - Importance, nature du remplissage et reprise d'érosion dans un conduit de joint - Caborne de Menouille (Jura)

Photo 19 - Nature du remplissage, évolution - Grotte de l'Eglise (Var)

Photo 20 - Plancher de calcite suspendu - Vallée du Verdon (Alpes de Haute Provence)

Photo 21 - Corrosion sélective - Fontaine l'Evêque (Var)

Photo 22 - Forme corrosion - Grotte de l'Eglise (Var)

Photo 23 - Rôle des failles - Alpes calcaires (Suisse)

Remarque : Les photos 1 à 23 sont groupées à la fin de la première partie.

2ème PARTIE - LES RETENUES MONOGRAPHIES

pages

CHAPITRE 3 - Le barrage de Bouvante - vue générale..... 142

CHAPITRE 6 - Le barrage de Charmine Moux - vue générale..... 178

CHAPITRES 7 et 8

photo 1 - Le barrage de la Chaudanne - vue générale de la rive droite..... 208

photo 2 - Le barrage de Castillon - vue générale de la rive gauche..... 192

photo 3 - Fracturation et injection de calcite dans les calcaires du crétacé..... 212

CHAPITRE 9

photo 1 - Le barrage de Canelles - vue générale..... 216

photo 2 - La grotte "des Piliers" appui rive gauche du barrage de Canelles..... 226

CHAPITRE 11

photo 1 - Barrage de l'Oued Nebaana parement de l'évacuateur de crue..... 256

photo 2 - Diaclase à remplissage incomplet de calcite..... 267

CHAPITRE 12 - Barrage de Gréoux - vue aérienne du site..... 278

CHAPITRE 13 - Barrage de Vouglans - vue aérienne du site..... 294

CHAPITRE 16 - Barrage de Quinson - vue du site depuis l'amont..... 341

CHAPITRE 17 - Barrage de Sainte Croix - vue aérienne du site..... 352

3ème PARTIE - BILANS ET SYNTHESE

CHAPITRE 4 - Dépôts de carbonate dans une galerie d'injection..... 428

Origine des documents :

La photographie 1 Chapitre 9 2ème Partie est de R. RIVOIRARD
La photographie 1 Chapitre 13 2ème Partie est de G. AKERMANN
Les autres photographies sont de R. THEROND.

index géographique

AAR (Pertes de l') - Allemagne - 39 F.39

AAR (Sources de l') - Allemagne - 28,81

ARGENS (Sources de l') - Provence - 78

ARIEGE - 91

ARTUBY - Provence - 39,59,81

AYGAS (Lac des) - Causses - 22,45

BANAT (Grottes du) - Roumanie - 11

BARAQUE (Aven de) - Causses - 44

BAUDINARD (Girges de ... et massif de...) - Provence - 20,42,43 - F.21

BOURGOGNE - karst bourguignon - 93,94

BOUVANTE - Vercors - 119,142 à 155 dont 4 figures - P. 142 - 387,389,391, 393,394,397,399,400,411 à 417,422,423 - T.380,398,401,402,412,414

CABORNE DE MENOUILLE - Jura - 15,18,43,45,94 - F.18,46 P.104,109 - 395

CAMARASA - Espagne - 119,129 à 141 dont 5 figures - 387,389,391,393,394,397,399 411 à 417,423,425,426,434 - F.380,398,401,402,412,414

CANELLES - Espagne - 93 - P.105 - 119,216 à 232 dont 6 figures - P.216 et 226 385,387,389,391,393,394,395,397,399,411 à 417,425,429 - T.398,401,402,412, 414,428,

CANJUERS(Grand plan et grand aven) - 23 - P. 15

CARLSBAD (Cave) - Nouveau Mexique - 69

CASSOLE (Source de) - 78

CASTILLON - Alpes de Haute Provence - 119,192 à 207 dont 4 figures - P.192 385,387,389,391,393,394,397,399,409,411 à417 - T.380,398,401,402,412,414

CAUSSES (Grands) - 11,22,32,45,423

CAUSSES - Nord montpellierains - 11,42,44, P. 105 voir aussi Ceyrac, Conqueyrac, Hérault, Grotte du Sergent

CEYRAC - Causses - 119,309 à 328 dont 4 figures - 387,389,391,393,394,397,399,400 404,407,408,424, T.380,398,401,402

CHARMINE-MOUX - Jura - 119,178 à 190 dont 4 figures - P.178 - 388,389,391,393,394, 397,399,411 à 417 - T. 380,398,401,402,412,414

(1) Les références renvoient aux pages.
P : photographie - F : figure - T : tableau -

CHAUDANNE (La) - Alpes de Haute Provence - 119,191,208 à 214 dont 6 figures P.208 et 212 - 380,387,389,391,393,394,397,407,408,411 - T.380,398,401,402

CHIAPAS - Mexique - 81

CHINE - 9

CHORUM DES AIGUILLES (Gouffre) - Alpes du Sud - 54

CONQUEYRAC - Causses - 119,309 à 322 dont 4 figures - 387,389,391,393,394,397, 399,400,404 - T.380,398,401,402

COTE D'OR - 94

DANUBE (Pertes du) - 39,81, - F.39

DESERT DE PLATE - Haute Savoie - 20 - P.97

EGLISE (Grotte de l') - Provence - P.102,109 - 395,396

ESPAGNE - 26 - voir aussi CAMARASA, CANELLES, MONTEJAQUE

FIZ (Eboulement des) - Haute Savoie - 78

FONTAINE DES CHARTREUX - 28

FONTAINE L'EVEQUE - Provence - 27,32,40,42,43,56,59,60,78,81,83,88 F.41,46,57 - P.102,106,107,107 - 424,426,427,434

FONTAINE DE NIMES - F.28

FONTAINE DE SAINT GEORGES - 28

FONTAINE DE VAUCLUSE - Provence - 28,40,60,63,78 - F.41

FOUX (Source de) - Causses - 78

GAPEAU (Source du) - Provence - 78

GENISSIAT (sur le Rhône) - 119,167 à 177 dont 3 figures - 387,389,391,393,394,397, 399,407,408,409,411 - F.380,398,401,402

GEORGES (Gouffre) - 54

GOURNEYRAS (Source de) - 28

GRANIER (Mont) - Savoie - 27 - P. 101

GREOUX - Provence - P.103 et 104 - 119,278 à 293 dont 5 figures - P.278 - 387,389,391,393,394,397,399,407,408,411,431,433 - F. 380,398,401,402

GROTTE GIGANTE - Italie - 69

HERAULT - 40 - P.106

HOLLOCH (Réseau du) - Suisse - 31,44,94 - T.30

ITALIE - 19,69 - voir aussi VAIONT

JABRON - Provence - 59

JURA - 86 - F.10,93 - voir aussi : CABORNE DE MENOUILLE, CHARMINE-MOUX, SAIZENAY, VOUGLANS

KARAOUN - Liban - 119,233 à 255 dont 5 figures - 387,389,391,393,394,395,397, 399,400,409,411 à 417,424 - F.381,398,401,402,412,414

LANGUEDOC (Bas) - 93

LEUBOT (Etangs de) - Jura - 22 - F.22

LIBAN - voir KARAOUN

LUIRE (Grotte de la) - Drôme - 44

MAMMOTH CAVE - U.S.A. - 31,92 - F.30

MEJANNES LE CLAPS (Plateau karstique de) - 42

MEXIQUE - 25,81

MONTEJAQUE - Espagne - 119,157 à 166 dont 3 figures - 387,389,391,393,394,395, 397, 399,411 à 417,423 - F.380,398,401,402,412,414

MONT GRANIER - Alpes - 27 - P.101

MONPELLIERAINS (Causses nord) - voir CAUSSES...

NEBAANA - Tunisie - 119,256 à 277 dont 5 figures - P.256,267 - 387,389,391 393,394,395,411 à 417 - F.380,398,401,402,412,414

OLTENIE (Grottes d') Roumanie - 11

ORGNAC (Aven d') - Massif Central - 69

PEILLOT (Rivière souterraine de) - Ariège - 91

PIERRE SAINT MARTIN (Gouffre de la) - Pyrénées - 25

PLAN DE CANJUERS - Provence - 15

PLATE (Désert de) - Haute Savoie - 20 - P. 97

POSTONYA (Salle du Concert) - Yougoslavie - 69

POT II - Vercors - 25

PROVENCE - 15,38,78,85 - voir aussi ARGENS, ARTUBY, BAUDINARD, CANJUERS, EGLISE, FONTAINE L'EVEQUE, GREOUX, JABRON, QUINSON, RIEZ VALENSOLE, SAINTE CROIX, VERDON -

PUITS DES HIRONDELLES - Mexique - 25

PYRENEES - 25,44

QUINSON - Provence - 119,329 à 348 dont 4 figures - P.337,341 387,389,391,393,394,397,399,407,408,409 - F.380,398,401,402

RIEZ VALENSOLE (Plateau de) - Provence - 23

REKA (Réseau de) - Yougoslavie - 44

RHONE - voir GENISSIAT

RIVES (Lac des Aygas ou des) - Causses - 22

ROUMANIE - 11

SAINTE CROIX - Provence - 15,119,349 à 371 dont 7 figures - P.252 387,388,389,391,393,394,395,397,399,400,411 à 417,421,422,424,431,433 - T.380,398,401,402,412,414, - voir aussi FONTAINE LEVEQUE -

SAINT MAURIN (Sources de) - Provence - 59

SAINT ROSAIRE (Source) - 78

SAINT VINCENT (Rivière souterraine de) - Pyrénées - 44

SAIZENAY (Résurgence de) - Jura - 93 - F. 94

SALSES (Source de) - 28

SANTANDER (Région de) - Espagne - 26

SAUVE (Source de) - Causses - 407 - voir aussi CEYRAC et CONQUEYRAC -

SERGENT (Grotte du) - Causses - P. 106

SERRE-PONCON (Barrage de) - sur la Durance - 435

SUECH (Poljé de) - Provence - 22 - P.98

SUISSE - voir HOLLOCH

TROU FUMANT de l'OLIVIER - Causses - 44

TUNISIE - voir NEBAANA

TURQUIE - 28

U.S.A. - 9,69

VAIONT - Italie - 385

VAL SUZON (Rivière souterraine de) - Cote d'Or - 94

VENETIE JULIENNE - Italie - 19

VERCORS - 25,44,94 - voir aussi BOUVANTE, LE POT II

VERDON - Provence - 15,18,20,40,59,81,87 - F.18 - P.102,109 -
421,424 - voir aussi BAUDINARD, CASTILLON, LA CHAUDANNE, GROTTE
DE L'EGLISE, FONTAINE L'EVEQUE, GREOUX, QUINSON, SAINTE CROIX

VERNA (Salle de la) - Pyrénées - 69

VOUGLANS - Jura - 15, 119,294 à 307 dont 4 figures - P.294
385,386,387,389,391,393,394,395,397,399,409,411 à 417,422,423 - F.380,398,
401,402,412,414

YOUGOSLAVIE - 22,44,69

Bibliographie

Cette bibliographie n'est pas une bibliographie exhaustive sur le karst. En particulier très peu d'ouvrages fondamentaux sont cités.

Seuls les articles et les publications des auteurs dont les travaux ont été utilisés dans la première et la troisième parties sont répertoriés.

Pour la deuxième partie, les documents utilisés sont cités en tête de chaque chapitre.

°
° °

ANONYME (1969) - "Actes du Congrès National d'Hydrogéologie, 31 mars-2 avril 1969"- Mémoires du B.R.G.M., n° 76.

ANONYME (1971) - "Actes du Colloque d'Hydrologie en pays calcaire" - Besançon-8 et 9 octobre 1971.

AUBERT D. (1969) - "Estimation de la dissolution superficielle dans le Jura" - Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, n° 324, vol. 69, fasc. 8.

BAKALOWICZ (1970) - "Hydrodynamique : Etude du bassin d'alimentation de la Manavgat (Taurus occidental, Turquie)" - Thèse de 3e cycle, Paris, 108 p.

BARBIER R. (1960) - "Le rôle des paléokarsts dans la formation des réseaux karstiques actuels et leurs répercutions sur l'hydrogéologie de ces pays" - C.R. S.G.F., 1960, 3, pp. 59-60.

BAUER E.W. (1971) - "Les secrets du Monde souterrain" - Paris, Flammarion, 128 pages, figures et photos.

BOËGLI A. (1964) - "Corrosion par mélange des eaux" - International Journal of Speleology, vol. 1, parts 1+2, pp. 61-70.

BÖGLI A. et FRANKE H.W. (1965) - "Ténèbres lumineuses" - Berne, Kümmerly et Frey, Editions géographiques, 89 pages, figures et photos.

BONNARDEL (1966) - "Le monde secret des cavernes" - Paris, Fernand Nathan, 80 pages, et photos.

CAVAILLE A. (1964) - "Observations sur l'évolution des grottes" - International Journal of Speleology, vol. 1, parts 1+2, pp. 71-99.

CHOPPY J. (1961) - "Etude statistique des cavités françaises" - Spelunca, mémoires n° 1, pages 19 à 21.

CHOPPY J. (1964) - "Les types de cavités de Vercors" - pages 50 à 57, Spelunca, mémoires, n° 4, pages 24 à 27.

CIRY R. (1963) - "Aperçu des principaux types de cavités souterraines de la Bourgogne, Côte d'Orienne" - Spelunca, mémoires n° 3.

C.N.R.S. (1967) - "Recherche sur les grottes du Banat et de l'Olténie" - Editions C.N.R.S.

COLIN - Avec le concours du groupe spéléologique jurassien (1966) - "Inventaire spéléologique de la France-I-département du Jura" - Editions du B.R.G.M.

DROGUE C. et PUECH P. - "Reconnaissances géologiques et hydrogéologiques pour la construction de barrages en terrains calcaires - Exemples des barrages écrêteurs de crues du Haut-Vidourle, Gard" - Terres et Eaux, vol. XXIII, n° 65, 12 pages.

DROGUE C. (1964) - "Etude hydrogéologique des principales résurgences de la région nord-montpelliéraine" - Mémoire du C.E.R.H., tome 1, Université de Montpellier, Institut de Géologie, pages 62 à 121.

DUBOIS P. (1961) - "Les karsts barrés du Bas-Languedoc" - Actes du 3e Congrès International de Spéléologie, Vienne 1961.

DUBOIS P. (1969) - "Sur la morphologie et l'évolution souterraine de la région calcaire nord-montpelliéraine" - Etudes et travaux de Méditerranée, n° 7, 1969, pages 37 à 50.

GAVIGLIO P. (1972) - Thèse de 3e cycle, Faculté des Sciences, Marseille (en cours de rédaction).

GEZE B. (1964) - "Sur les profils normaux des entrées de grottes et des galeries simples" - Spelunca, mémoires-n°4, pages 24 à 27.

GEZE B. (1965) - "La spéléologie scientifique" - Paris, Editions du Seuil, 190 pages.

GEZE B. (1968) - "Observations sur le réseau du Höllöch, Muotathal, Canton de Schwyz, Suisse" - Annales de Spéléologie, tome 23, fasc. 2, 1968.

GEZE B. et MOINEREAU J. (1966) - "Sur l'évolution des sédiments argileux dans les cavernes en fonction de la profondeur" - p. 58 à 63, Spelunca, mémoires n° 5.

GOGUEL J. (1953) - "Données techniques sur l'effondrement des cavités souterraines"- Annales de Spéléologie, tome VIII, fasc. 1.

KOCH P. (1967) - "Les réseaux d'égoûts" - Paris, Dunod, 338 pages.

LLOPIS LLADO (1970) - "Fundamentos de Hydrogeologia Carstica" - Madrid, Blume édit. 270 pages.

MANGIN A. (1969) - "Etude hydraulique du mécanisme d'intermittence de Fontestorbes (Belesta, Ariège)" - Annales de Spéléologie, tome 24, fasc. 2, 1969, pages 253 à 298.

MANGIN A. (1970) - "Méthode d'analyse des courbes de décrue et tarissement dans les aquifères karstiques" - C.R. Acad. Sc. Paris, t. 270, série D, pages 1295 à 1297.

MANGIN A. (1970) - "Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et de tarissement" - Annales de Spéléologie, tome 25, fasc. 3, 1970, pages 582 à 609.

MICHARD A. (1969) - "Les dolomies, une revue" - Bulletin du Service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, tome 22, fasc. 1, pp. 1-92, 1969.

MONTEILS J.P. (1968) - "Exploration de la Fontaine de Nîmes" - Supplément à Nemausa, Bulletin de l'A.S.N., 42 pages, 1968.

MUGNIER (1968) - "Un réseau uniquement orienté par la tectonique" - Revue du spéléo-club de Dijon, tome VII, fasc. 2, 1968.

MUXART R. et STCHOUZKOY-MUXART T. (1969) - "Contribution à l'étude de la dissolution des calcaires dans les eaux naturelles" - Ann. Spéléo. n° 4, 1969, pp. 639 à 651.

PALOC H. (1964) - "Caractéristiques hydrogéologiques des dolomies de la région languedocienne" - Mémoire du C.E.R.H., tome 1, Université de Montpellier, Institut de Géologie, pages 124 à 127.

PALOC H. (1966) - "Carte hydrogéologique de la France - Région karstique nord-montpelliéraine" - Notice explicative, 207 pages, B.R.G.M., mémoire n° 50.

PAVLIN, MLADINEO, STOBICAN et NONVEILLER (1955) - "Bassin d'accumulation de Peruca dans le karst dinarique", 5e Congrès des Grands Barrages, Q. 18, R. 22, 1955.

RENAULT Ph. (1967) - "Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléo genèse" - Thèse de Doctorat publiée dans les Annales de Spéléologie, tome XXII, fasc. 1, 1967, tome XXII, fasc. 2, 1967, tome XXIII, fasc. 1, 1968.

RENAULT Ph. (1969) - "Sur les phénomènes de détente mécanique qui sont à l'origine des réseaux de cavernes dans le sous-sol des karsts" - C.R. Acad. Sc. Paris, t. 268, 24/2/1969.

RENAULT Ph. (1970) - "La formation des cavernes" - Collection "Que sais-je" n° 1100, 127 pages.

SALVAYRE H. (1964) - "Les lacs temporaires du Larzac et de son avant-Causses", pages 79 à 103, Spelunca, mémoires, n° 4.

SALVAYRE H. (1968) - "Contribution à l'étude hydrogéologique des Grands Causses" - Thèse de doctorat.

TRIPET J.P. (1969) - "Une méthode d'approche de l'analyse du tarissement d'une source karstique" - Université de Neufchâtel, Institut de Géologie, Centre d'hydrogéologie, février 1969.

TROMBE F. (1965) - "La spéléologie" - Paris, P.U.F., Collection "Que sais-je ?", n° 709, 127 pages.

VERDEIL P. (1961) - "Principes généraux de la karstification" - Spelunca, 15 pages, Spelunca, mémoires, n° 1, p. 19 à 21.

VOUVE J., CAZAL A. et POUCHAN P. (1970) - "Détection à distance par radiométrie infrarouge des émergences de la Gironde. Relations avec l'aquifère côtier"- C.R. Acad. Sc., n° 6, 9/2/1970, pp. 760 à 763.

WAHL J.B. et G.S. des campeurs d'Alsace - "Le gouffre Grotte du Leubot" - Publication du groupe spéléologique des campeurs d'Alsace.

WHITE W. (1969) - "Conceptual models for carbonate aquifers" - Ground Water, U.S.A., 1969, n° 3, pp. 15 à 21.

WITTKE W. (1969) - "L'écoulement dans les roches fissurées" - Versuchsanstalt für wasserbau und kultur teckink pheodor-rehbock, flussbaulaboratorium, Karlsruhe, n° 155, 1969, PP. 121 à 153.

YEVDJEVIC J.M. (1955) - "Les bassins d'accumulation en terrain karstique" - 5e Congrès des Grands Barrages, Q.18, R.40.

° °
°

GEZE B. (1957) - "Caractères des circulations karstiques d'après les récentes colorations à la fluorescéine en France" - Compte rendu scmmaire de la Société Géologique de France, 1972 pp. 351 - 355.

FENELON (1967) - "Vocabulaire français des phénomènes karstiques" - C.N.R.S. Mémoires et Documents - 1967 - Nouvelle série - Vol. 4 pp. 13 à 81.

1re
partie

LE MILIEU KARSTIQUE

introduction

(SUMMARY, see page 5)

Au début de l'étude géologique d'un lac de barrage situé dans une région karstique, le premier objectif du géologue est de reconnaître l'importance et de comprendre la signification des indices karstiques recueillis ; c'est une condition nécessaire pour poser correctement le problème de l'étanchéité.

Dans ce but, il lui est indispensable de distinguer parmi les indices recueillis, l'essentiel du secondaire et, parmi les caractères retenus, le normal de l'exceptionnel.

°
° °

Cette première partie, intitulée "Le milieu karstique", a donc été conçue comme un catalogue des caractéristiques morphologiques et hydrauliques du karst présentant pour chaque caractéristique, d'abord les observations, puis les interprétations et enfin les incidences possibles sur les travaux de génie civil.

On notera que certains aspects importants de la karstification n'ont pas été évoqués ou l'ont été d'une façon secondaire, en particulier chaque fois que l'intérêt d'un développement n'est pas apparu évident ; par exemple : vitesse d'évolution des processus de karstification, chimie des eaux, minéralogie des concrétions, phénomènes de génèse, etc.

°
° °

Le souci de préciser l'importance relative d'un indice nous a conduit à indiquer, chaque fois que la mesure était possible, les valeurs caractéristiques (maximum, minimum, moyenne) qui peuvent ainsi servir de référence, par exemple : extension des réseaux, vitesses de circulation, valeurs des mises en charge, etc.

Malheureusement, certains caractères échappent à la mesure simple, par exemple la morphologie souterraine. Pour de tels caractères, l'évaluation de l'importance devient subjective. Pour que l'exposé reste clair et que les cas réels puissent être décrits simplement, il a fallu faire des coupures artificielles (grand, petit, fort, faible).

Ces appréciations correspondent généralement à une simplification de la réalité et par cela même, à une déformation de celle-ci, car la règle générale est la complexité et l'interdépendance des caractères.

Pour cependant nuancer ce qui pourrait être artificiel et peut-être excessif dans certaines schématisations, la solution adoptée à été le commentaire infrapaginal. Ce mode d'exposé a été choisi en pleine conscience des critiques qui peuvent lui être faites.

°
° °

Le plan adopté pour cette première partie est, rappelons-le, le suivant :

chapitre 1 : fréquence, importance et signification des indices karstiques dans une région calcaire ;

chapitre 2 : le réseau karstique (nature, morphologie et géométrie) ;

chapitre 3 : le fonctionnement du réseau karstique ;

chapitre 4 : morphologie des vides karstiques ;

chapitre 5 : les mécanismes de génèse et d'évolution du karst ;

chapitre 6 : influence des caractéristiques géologiques sur l'établissement d'un réseau.

Ce plan a été choisi car c'est celui qui se rapproche le plus du déroulement chronologique de l'étude du karst dans le cas de l'étude de l'étanchéité d'une retenue :

Chapitre 1 : Signification des indices : c'est la première phase (prospection) ; il faut porter un jugement sur l'importance régionale de la karstification.

Chapitre 2 : Précision sur l'organisation et la géométrie des réseaux souterrains de drainage : c'est la deuxième phase. Cette connaissance se fait à partir des observations effectuées sur la partie amont (zone d'alimentation) et sur la partie aval (zone de l'émergence) du réseau.

Chapitre 3 : Connaissances complémentaires mais indirectes sur le karst à partir du régime des eaux : c'est la troisième phase qui nécessite une longue période d'observation (1 an au minimum).

Chapitre 4 : Type morphologique des vides karstiques. L'importance de ce caractère est liée au fait que la vulnérabilité d'un karst vis-à-vis du risque de débourrage est fonction du type morphologique des vides karstiques ; la difficulté de traiter le terrain dépend également de la morphologie des vides et de la nature des remplissages. La connaissance de ce caractère du karst se précise au cours de l'étude mais certains aspects ne sont connus que tardivement par les galeries de reconnaissance.

Chapitres 5 et 6 : Enfin, le rôle des mécanismes de genèse et d'évolution, et l'influence des caractéristiques géologiques doivent être rappelés pour expliquer la diversité des cas réels.

Conclusion : Nature du réseau karstifié.

Remarque :

Nous emploierons les termes karstification, karstiques, karsts, karstifiés, avec le sens qu'ils ont dans le langage courant sur les chantiers de génie civil, en nous efforçant toutefois d'éviter les confusions.

Les calcaires karstiques ou karstifiés sont les calcaires qui portent des traces évidentes, (vides ou le plus souvent poches argileuses) de l'érosion karstique. Le terme karstification aura le sens, selon les cas, de processus de dissolution ou de processus de colmatage.

Le terme karst sera employé dans le chapitre 4 dans un sens particulier.

Il faut remarquer que, sur les chantiers, pour les non-spécialistes, un remplissage concrétionné sans vide important et sans argile n'apparaît pas comme un indice karstique et passe même souvent inaperçu.

o
o o

RESUME

When starting the geological survey of a storage reservoir in a karstic area, the geologist's first concern is to investigate the size and understand the significance of the karst indications. This is a prior condition for approaching the question of watertightness properly.

In this work, he must be able to distinguish the essential from the secondary indications and the normal from the exceptional reservoir characteristics.

o
o o

Part 1, entitled "Karstic Environment", has therefore been planned as a catalogue of the morphological and hydraulic characteristics of karst, with observations, interpretations and lastly the possible incidence on engineering works of each characteristic.

The reader will notice that certain important aspects of karstification are not considered or are mentioned only briefly, mainly where there was no obvious interest of dealing with them in more detail, as for example, with the rate of developement of karstification, water chemistry, mineralogy of concretions, genesis, etc.

CHAPITRE

1

Les indices karstiques

FREQUENCE, IMPORTANCE ET SIGNIFICATION DES INDICES KARSTIQUES DANS UNE REGION CALCAIRE

PLAN

1. Inventaires
2. Commentaires
3. Conclusions

RESUME

Le recensement systématique des indices karstiques dans une région ou, de préférence, dans une unité géologique, permet, par comparaison avec des régions mieux connues, de porter un jugement sur l'importance de la karstification et sur la localisation préférentielle des réseaux karstiques.

Par exemple, dans les régions karstiques, la densité des indices (grottes, avens, sources) est voisine de 1 à 3 au km². 1 grotte seulement sur 100 a un développement supérieur à 500 m.

A proximité immédiate des sites de barrage, l'exploitation de ces statistiques doit cependant être faite avec prudence.

KARST INDICATORS

SUMMARY

A systematic inventory of karst indications in an area or, preferably, a geological unit, and comparison with more fully documented areas makes it possible to estimate the degree of karstification and the preferential positions of karst systems.

For example, the density of indications (caves, pot-holes, springs) in karst areas is close to 1 to 3 per km². Only 1 cave in 100 is more than 500 m long.

In the immediate vicinity of dam sites however, these statistics must be used with caution.

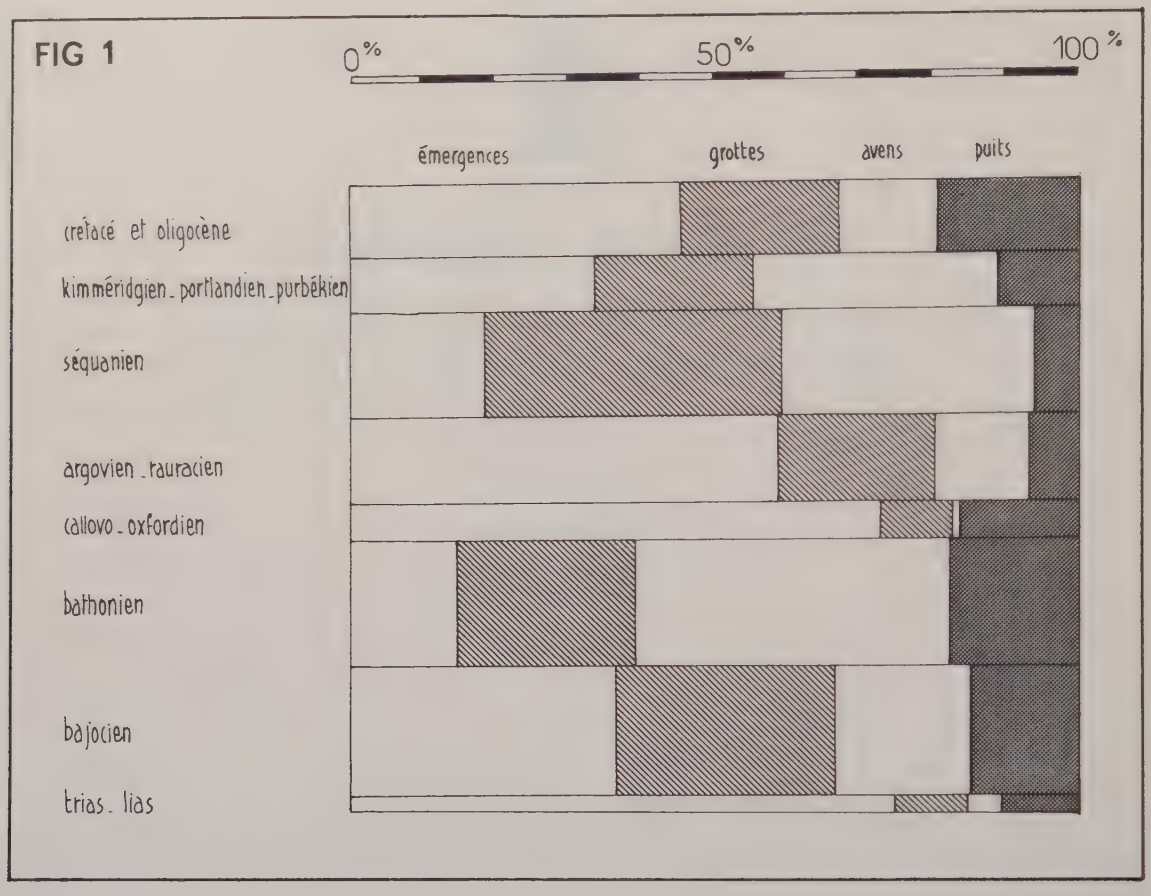


Fig. 1 : Répartition des différents types de cavités dans les séries géologiques du Jura français (d'après CHOPPY J. - 1961).

1 - LES INVENTAIRES

Les aspects les plus visibles de la karstification sont, d'une part les formes de surface, lapiaz, dolines, poljés, reculées et vallées aveugles, et d'autre part les avens, les grottes, les pertes de rivières et les résurgences, indices des formes souterraines.

Ce deuxième groupe présente l'avantage d'être plus facile à comptabiliser, bien qu'il ne soit pas impossible de mesurer la surface des bassins fermés, des poljés, etc. Il n'existe cependant, à notre connaissance, aucun travail exhaustif basé sur ce principe.

Par contre, le bilan des indices karstiques du deuxième groupe, et en particulier des cavités, a été entrepris dans de nombreux pays. Par exemple :

U.S.A. : 11.000 cavités naturelles répertoriées,
FRANCE : 9.000 cavités naturelles répertoriées (1).

Dans les pays où l'activité spéléologique est ancienne, ces inventaires reflètent la réalité karstique de la région ; ils peuvent être exploités du point de vue statistique (2).

En faisant, par exemple, la distinction : perte, grotte sèche, aven sec, émergence, [Choppy J. (1961)], on obtient pour 6.500 grottes françaises la répartition suivante :

- pertes : 6 %
- avens : 37 %
- grottes : 43 %
- émergences : 14 %

Des classements peuvent également être réalisés par rapport à d'autres critères. Par exemple, on peut classer les grottes en diverses catégories selon les coupures proposées par Erhenberg, c'est-à-dire :

- longueur cumulée des galeries comprise entre 0 et 50 m : petite grotte ;
- longueur cumulée des galeries comprise entre 50 et 500 m : grotte moyenne ;
- longueur cumulée des galeries comprise entre 500 et 5000 m : grande grotte ;
- longueur cumulée des galeries supérieure à 5000 m : grotte géante.

Selon ce critère de classement, on obtient par exemple pour 850 grottes ou avens situés dans le Jura français, [Colin J. (1966)] :

(1) *Toutes les grottes ne sont pas encore répertoriées ; on estime à plus de 20.000 le nombre de cavités reconnues, signalées en bibliographie (renseignement H. Paloc).*

(2) *La surface totale des terrains calcaires qui affleurent est évaluée à 3.200.000 km2 soit environ 2,2 % de la surface totale des terres émergées. Les zones bien étudiées sont encore une minorité. En Chine, par exemple, existe une région calcaire d'un seul tenant, mal connue sous l'angle du karst, dont la surface est proche de la surface de la France, [Bauer E.W. (1971)].*

		Surface respective des formations calcaires					nombres Indices karstiques : 3.339					Total		Densité au km2	
		Georgien Dévonien	Lias	Jurassique	Crétacé	Tertiaire	Sources pérennes	temporaires	pertes	Cavités regards	Cavités fossiles	nombre	%	moyenne	fourchette
Surface calcaire totale 5.053 km	Socle	200 km2 soit 4 %										125	3,7 %	0,6	0,3 à 1,3
	Grandes Causses		1.388 km2 soit 27,5 %	3.290 km2 soit 65 %								1961	58,7 %	0,5	0,2 à 1,5
	bordure mérionale				75 km2 soit 1,5 %	100 km2 soit 2 %						1253	37,5 %	1,3	0,3 à 1,9
							455	277	183	262	2160 dont 16 supérieures à 2000 m de développement			0,7	

(1) sources de 0 à 5 l/s
(2) " 5 à 25
(3) " 25 à 100
(4) " 100 à 250
(5) " 250 l/s et plus

(1) 286
(2) 110
(3) 37
(4) 10
(5) 12

fig. 2

FIG 2

Tableau résumé de la distribution et de la nature des indices karstiques dans la région des Grands Causses (Paloc 1971)

- grottes géantes : 2 soit 0,2 %
- grandes grottes : 10 soit 1,2 %
- grottes moyennes : 88 soit 10,5 %
- petites grottes : 750 soit 88,2 %

Suivant le même critère, on obtient pour 150 grottes (grottes du BANAT et d'OLTENIE), C.N.R.S. (1967) :

- grotte géante : 1 soit 0,7 %
- grandes grottes : 17 soit 11,3 %
- grottes moyennes : 59 soit 39,3 %
- petites grottes : 73 soit 48,7 %

Les inventaires par unité politique (France, U.S.A.) mettent en évidence les caractéristiques les plus générales de la karstification dans un pays donné. Mais il est préférable de comptabiliser les indices par unité géologique calcaire homogène, car une exploitation plus poussée des recensements peut alors être réalisée.

On peut par exemple évaluer la densité de la karstification dans une zone donnée et la comparer à la densité existant dans d'autres zones. On peut également préciser la fréquence des indices dans les différentes unités stratigraphiques.

Exemple 1 : JURA calcaire français, [Colin J. (1966)].

C'est une région assez bien connue malgré le double handicap d'une végétation dense et de dépôts morainiques qui masquent des surfaces importantes.

- Surface prise en compte : 5.055 km2
- Nombre de cavités connues : 850

Le tableau (fig. 1) montre la répartition des cavités pour cette région, en fonction de leur nature et de l'étage géologique où elles sont situées.

Exemple 2 : région NORD-MONTPELLIERAINE, [Paloc (1966)].

- Surface prise en compte : 1.730 km2
- Nombre de sources et de cavités recensées : 2164 dont 873 actives
  357 sources pérennes
- Densité moyenne : 1 grotte au km2.

Exemple 3 : GRANDS CAUSSES (France)

Le tableau (fig. 2) présente les principales moyennes extraites d'une analyse très détaillée de l'inventaire des indices karstiques (Paloc, 1971, inédit).

Les indices sont classés par rapport à plusieurs critères : nature de l'indice, débits des sources, surface des formations encaissantes, etc.

2 - COMMENTAIRES - BILANS

Les inventaires, tels que ceux cités en exemples, ont le mérite de mettre clairement en évidence un certain nombre de caractéristiques très générales de la karstification.

- Tous les bilans conduisent à constater que :

Les grottes qui ont un développement (longueur cumulée des galeries) supérieur à 500 m (sans travaux au rocher importants) sont rares ; elles doivent être considérées comme l'indice d'une karstification importante (1).

Les sources karstiques pérennes dont le débit moyen est supérieur à 250 l/s sont également rares.

Dans les régions franchement karstiques où la prospection spéléologique a été poussée, la densité est voisine de 1 (1 grotte au km2), elle peut même atteindre 3. Dans les régions moins bien connues, une campagne de reconnaissance sommaire donne rapidement une densité de 0,5 grotte au km2 si la karstification est avancée.

L'étude approfondie d'une grande unité régionale calcaire permet donc d'obtenir le "portrait-robot" de la karstification. Mais il faut savoir que les études de cette importance restent encore exceptionnelles (2).

3 - CONCLUSIONS

L'étude statistique régionale est la seule technique permettant d'apprécier l'intensité moyenne de la karstification d'un secteur de cette région où l'observation est difficile ou même impossible. Elle indique aussi la localisation stratigraphique préférentielle et le type morphologique des indices à rechercher dans ce secteur.

Les résultats doivent cependant être maniés avec beaucoup de prudence à proximité immédiate des sites de barrage, parce que ceux-ci sont presque toujours des zones géologiques singulières. Les conditions géologiques locales dans ces zones ont, soit favorisé, soit freiné la karstification. Par contre, pour l'étude de l'étanchéité des retenues, les résultats fournis par les statistiques sont plus facilement applicables.

(1) *La réciproque n'est pas vraie; l'absence de grande cavité doit être interprétée avec beaucoup de prudence et tout d'abord être jugée en fonction de l'activité spéléologique, et de l'importance des terrains de couverture.*

(2) *L'intérêt de ces bilans régionaux dépasse largement le domaine de l'étude des retenues artificielles. Ils s'avèrent de jour en jour plus nécessaires pour maîtriser, exploiter et protéger les ressources en eau d'une région.*

°
° °

CHAPITRE

2

Le réseau karstique

PLAN

1. Définition - Exemples
2. Schéma d'un réseau
3. Modèle tri-dimensionnel d'un réseau
4. Complexité des cas réels

°
° °

RESUME

Les deux réseaux décrits illustrent une règle générale : la partie connue (c'est-à-dire visitable) d'un réseau ne représente qu'une très faible partie du système.

Le réseau type reconstitué à partir d'observations fragmentaires, peut être schématisé comme suit :

- *en surface se situe la zone d'absorption, dont le lapiaz représente le terme le plus typique et le plus évolué.*
- *à quelques mètres au-dessous, des fissures et des conduits verticaux peu nombreux assurent l'enfouissement vertical des eaux. C'est la zone de transfert dont l'épaisseur peut atteindre 400 m. Elle achemine les eaux vers une zone noyée en permanence dans laquelle un système de conduits horizontaux assure le cheminement des eaux vers l'émergence.*

A partir d'une émergence pénétrable, l'exploration sportive poussée peut fournir une image représentative du réseau. Mais des moyens et des travaux importants sont souvent nécessaires si on veut installer et exploiter des stations de mesure à l'intérieur d'un réseau karstique.

THE KARSTIC NETWORK

SUMMARY

The two networks described illustrate a general rule, that the explored part represents only a small proportion of the complete system.

A typical system built up from fragmentary information can be described schematically as follows :

- *at the surface, there is an absorption zone, the most typical and developed form being the lapiaz,*
- *a few metres below, there are a limited number of vertical cracks and pits by means of which the water travels vertically down - this is the transfer zone, which can be up to 400 m thick,*
- *the water thus penetrates into the permanently submerged zone in which the system of horizontal pipes carries it to the point of emergence.*

Determined amateur exploration inside any spring big enough to allow a man to pass can give a representative picture of the system. But major resources and works are often needed if measuring stations are to be set up and operated inside the karst system.

o
o o

1 - DEFINITION - EXEMPLES

Le réseau karstique élémentaire (1) est constitué par l'ensemble des fissures, galeries, conduits qui ramènent à l'émergence les eaux infiltrées. Dans une région karstique, l'évacuation des eaux peut être assurée par un nombre très variable de réseaux. Certains contrôlent plusieurs centaines de km2 de bassin versant, d'autres quelques hectares seulement. Inversement, dans certains cas, il peut exister des diffluences, plusieurs sources étant alors alimentées par un même dispositif de drainage.

Les deux exemples décrits dans les pages suivantes sont des réseaux d'importance différente. Ils ont été choisis en raison des recherches approfondies dont ils ont fait l'objet, dans le cadre des études des barrages de SAINTE CROIX pour le réseau de FONTAINE L'EVEQUE, et de VOUGLANS pour la CABORNE DE MENOUILLE.

• EXEMPLE 1 : LE RESEAU DE FONTAINE L'EVEQUE

C'est vraisemblablement le plus grand réseau karstique de PROVENCE après celui de FONTAINE DE VAUCLUSE.

Il aboutit à la source de FONTAINE L'EVEQUE dont le débit moyen est de 5,7 m3/s.

Cette source restitue au VERDON les eaux d'un impluvium qui ne peut être inférieur à 450 km2, compte tenu des débits spécifiques régionaux (2).

Une série de colorations a permis de préciser l'ampleur et la localisation de la zone d'alimentation (fig. 3).

Dans la zone d'alimentation, l'indice karstique le plus spectaculaire est le poljé du GRAND PLAN DE CANJUERS, dépression fermée dont la superficie dépasse 70 km2. Au centre, s'ouvre, à la cote 864, le GRAND AVEN DE CANJUERS (fig. 4) qui s'enfonce de 250 m par trois puits principaux, jusqu'à la cote 590.

(1) *Dans la réalité, le réseau karstique est complexe car il correspond à la superposition de plusieurs réseaux d'âge différent en partie fossiles. A ce réseau complexe, on peut opposer un réseau élémentaire creusé en une seule phase de karstification et dont toutes les parties jouent un rôle dans le drainage du massif calcaire.*

(2) *Dans certains cas, la notion d'impluvium nécessaire pour fournir un débit mesuré à la source, doit être maniée avec prudence. En effet, une source karstique restitue souvent des eaux d'origine diverse : eaux infiltrées, pertes de rivières, etc. Dans ces cas, l'impluvium correspondant est théorique et n'est pas en totalité topographiquement localisable.*

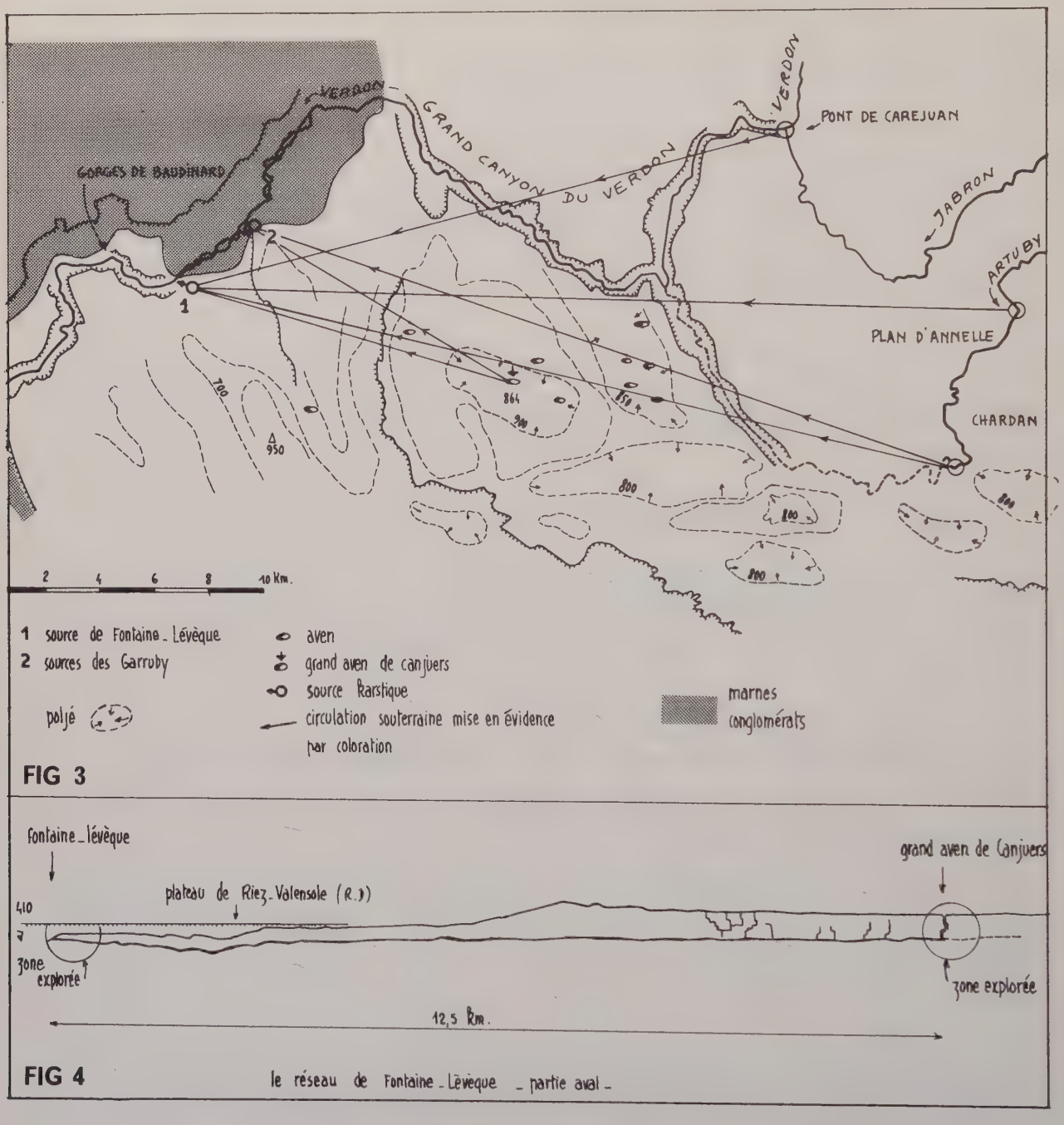


FIG 3

FIG 4 le réseau de Fontaine-Lévêque - partie aval -

Fig. 3 : FONTAINE L'EVEQUE - Localisation du bassin d'alimentation.

Fig. 4 : FONTAINE L'EVEQUE - Coupe du réseau entre la source et le grand aven de Canjuers.

Au-delà de la base du troisième puits, un réseau horizontal de plus de 650 m de développement a été exploré. En période de crues, ce réseau de faible section est peut-être envahi par les eaux. Peu ramifié, il a un tracé en baïonnette, calé sur des diaclases. Des puits secondaires descendent à la cote (IGN) 590, sans atteindre des circulations pérennes (1).

A partir de la source de FONTAINE L'EVEQUE, l'exploration par plongées a permis d'explorer le réseau sur 400 m environ (fig. 5).

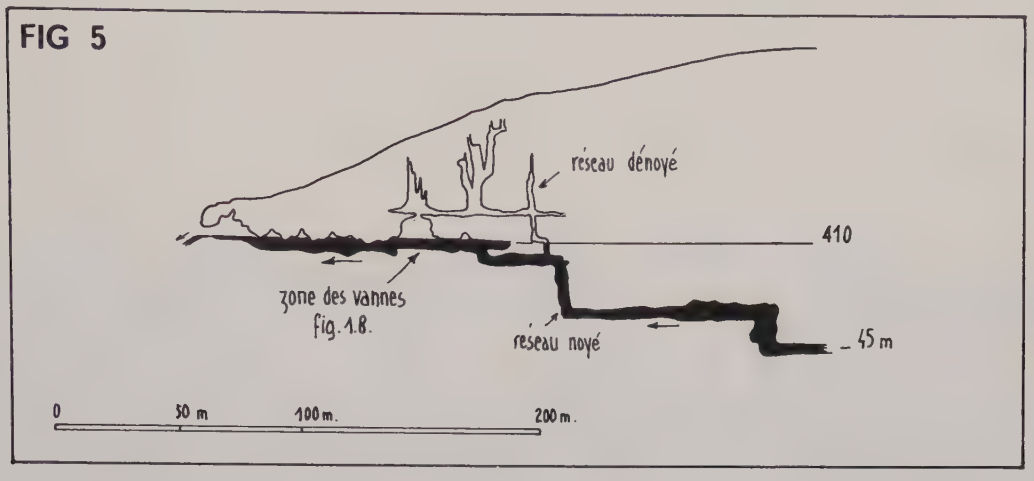


Fig. 5 : FONTAINE L'EVEQUE - Coupe verticale du réseau noyé exploré par plongées à partir de l'émergence.
Documents Electricité de France - G.E.P.S.

Le conduit reconnu a un tracé descendant en baïonnette ; il est constitué par une succession de puits verticaux et de galeries horizontales. Il s'enfonce jusqu'à -45 m. A l'exception d'une salle située 100 m à l'amont de la source et que la rivière traverse en écoulement libre, le réseau est entièrement noyé et l'écoulement se fait en charge.

A partir de la salle à écoulement libre, l'exploration et les désobstructions ont mis en évidence des réseaux supérieurs hors d'eau raccordés au réseau actif par des puits. A la verticale de l'ensemble, malgré la faible épaisseur de la couverture rocheuse, aucun indice ne jalonne le tracé souterrain.

La coupe passant par la source et le GRAND AVEN DE CANJUERS (fig. 4) permet de faire deux constatations :

1) Les parties connues sont négligeables par rapport aux parties inconnues du réseau (fig. 4) ;

(1) *Toutes les explorations ont été réalisées en été, période d'étiage. Il est possible qu'en période de crues, la base du réseau exploré soit active.*

2) Dans la zone d'infiltration, les eaux s'enfoncent pratiquement à la verticale sur 300 m jusqu'à une cote inférieure à 590. La pente piézométrique entre le GRAND AVEN et la résurgence est donc inférieure à 180/12.000, c'est-à-dire 15/1.000, le numérateur étant évalué par excès et le dénominateur par défaut.

● EXEMPLE 2 : LA CABORNE DE MENOUILLE (fig. 6)

Avec 5590 m de galeries explorées, la CABORNE DE MENOUILLE est un des trois plus importants réseaux actuellement connus dans le Jura français. L'entrée principale s'ouvre à la cote 400 sur la bordure Sud d'un plateau calcaire sensiblement horizontal, le plateau de CERNON.

L'importance régionale de la CABORNE est en partie liée à l'effort exceptionnel de prospection (décolmatage, pompage, galerie artificielle) qui a été fait dans le cadre des études du barrage de VOUGLANS (voir 2ème partie, chapitre 13).

Contrairement à FONTAINE L'EVEQUE, la source pérenne est impénétrable. L'exploration se fait à partir d'une entrée non fonctionnelle située 70 m au-dessus de la source. A partir de cette entrée, des galeries sensiblement horizontales permettent d'atteindre des puits qui rejoignent des galeries inférieures où l'écoulement est permanent (le puits P60 par exemple). La liaison a été réalisée par des cheminements ascendants avec le plateau de CERNON qui appartient au bassin d'alimentation du réseau. En période de crues, les galeries inférieures sont noyées. Des colorants injectés à plus de 8 km ont coloré les eaux de la source, mettant en évidence l'extension de l'impluvium.

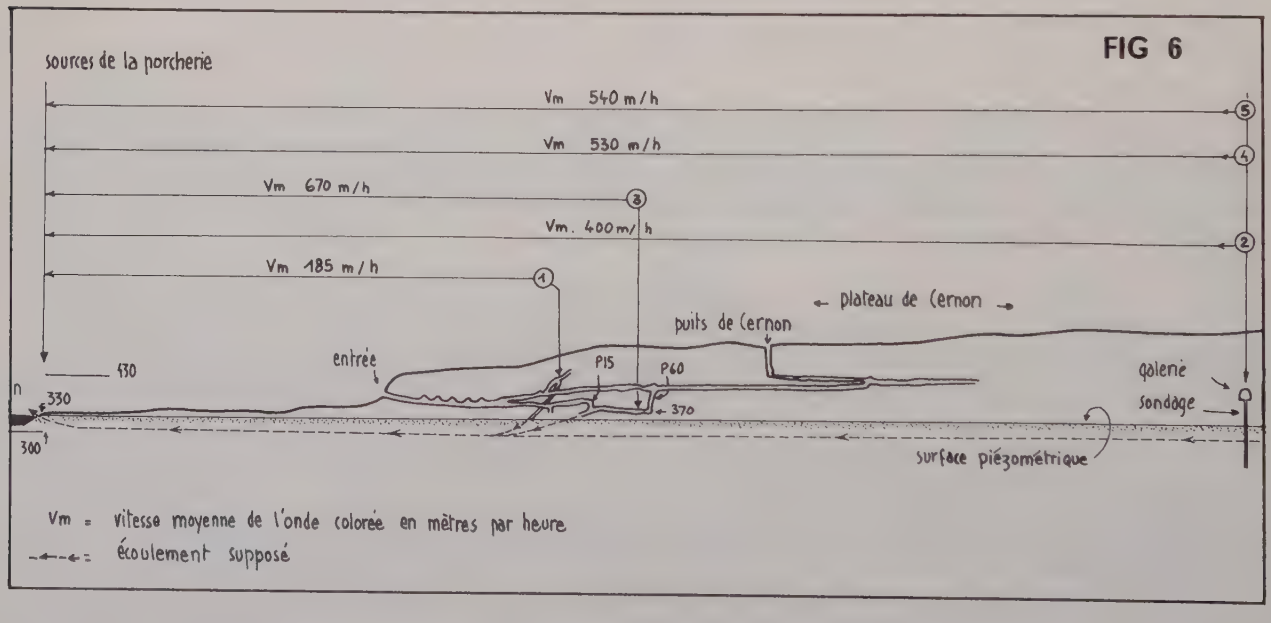


Fig. 6 : LA CABORNE DE MENOUILLE - Schéma simplifié du réseau en projection verticale.
Documents Electricité de France.

Pour ce réseau, on peut également faire trois constatations :

1) Si la partie aval connue est exceptionnellement grande (c'est une des trois plus grandes cavités du JURA), elle est cependant largement inférieure à la partie inconnue ;

2) Des puits verticaux relayés par des galeries horizontales assez courtes acheminent rapidement les eaux vers le bas.
Les essais de coloration ont montré par ailleurs que les principales circulations s'effectuent à un niveau inférieur au niveau connu le plus bas. La pente hydraulique en période de basses eaux est donc également faible ;

3) Le réseau se développe dans 3 dimensions ; mais la plupart des galeries supérieures horizontales sont devenues non fonctionnelles ; des puits de raccordement se sont créés, assurant un transfert plus rapide des eaux vers les zones profondes.

- COMMENTAIRES

Les caractères morphologiques qui apparaissent dans les deux exemples cités, se retrouvent dans un grand nombre de cas, et plus particulièrement dans les réseaux qui drainent les grands plateaux calcaires constitués par des couches proches de l'horizontale.

L'étude statistique de l'inclinaison des conduits karstiques confirme en effet que ceux-ci sont généralement soit verticaux (puits), soit sensiblement horizontaux (galeries). Par exemple, en VENETIE JULIENNE, l'analyse de 525 cavités montre que les puits verticaux représentent 50 % de la longueur totale développée, la majorité des autres conduits ayant une pente inférieure à 30°, Gèze (1966).

Quand l'exploration permet d'atteindre la zone noyée, on constate que le gradient hydraulique est rarement supérieur à 5 ‰.

2 - SCHEMA D'UN RESEAU

Les deux exemples cités illustrent en partie les différentes zones que l'on peut distinguer dans un réseau karstique.

Le réseau karstique élémentaire a été décrit par plusieurs auteurs et notamment par Cavaillé A. (1964).

En tenant compte des exemples cités et du schéma proposé par Cavaillé, le réseau karstique élémentaire peut être décomposé en 3 parties :

1) la zone d'absorption : son épaisseur ne dépasse pas quelques mètres sous la surface topographique ;

2) la zone de transfert : elle est caractérisée par l'enfoncement vertical des eaux en écoulement généralement libre ;

3) la zone d'écoulement horizontal : c'est une zone plus ou moins noyée, où l'écoulement est libre ou en charge.

● REMARQUES

Ces 3 zones du réseau sont définies par rapport à des critères hydrodynamiques : absorption, transfert, écoulement, alors que l'observation directe fournit généralement des critères morphologiques : vertical, horizontal - fissures, galeries, etc.

Le plus souvent, il existe une relation directe et simple de cause à effet entre ces deux types de critères ; c'est le cas pour les 3 zones définies ci-dessus.

L'étude hydrodynamique du réseau (chapitre 3) fournit un modèle plus complexe et théoriquement plus juste, mais qui est en pratique plus difficile à reconnaître in situ, car pour certaines zones, la relation morphologie-hydraulique est moins évidente.

Enfin, il faut rappeler qu'il existe d'importants types morphologiques souterrains, indépendants des mécanismes hydrodynamiques, morphologies d'éboulement, de concrétion, etc.

2.1. LA ZONE D'ABSORPTION

Les 3 exemples suivants illustrent la variété des paysages et des morphologies de surface que l'on rencontre en pays calcaire.

A) Bassin versant de rivière fossile (fig. 7)

Une partie du massif calcaire constitue le bassin versant topographique d'un ruisseau affluent du VERDON. Quelle que soit l'importance des pluies, aucun écoulement de surface n'atteint le VERDON. Le réseau hydrographique de surface est cependant bien dessiné ; il se raccorde au VERDON actuel par un ressaut de 30 m environ. Les eaux de pluie s'infiltrent par les multiples fissures du terrain et alimentent une source karstique située dans la rivière. Aucun aven n'est connu. Le terrain est en grande partie boisé.

B) Les lapiaz : exemple le DESERT DE PLATE, Alpes du Nord, (département de la Haute Savoie, France) (photo 1).

C'est un lapiaz caractéristique où la marche même est difficile. Aucun véritable écoulement de surface n'est observable (1). Les fissures s'enfoncent sur quelques mètres avant de devenir impénétrables. De nombreux "puits à neige"

(1) *L'observation d'un violent orage sur ce lapiaz (juillet 1971) montre que les rigoles de surface sont parcourues après quelques minutes de pluie par des écoulements spectaculaires qui, généralement, disparaissent dans des puits absorbants après des parcours en surface rarement supérieurs à 100 m. Un quart d'heure après la fin de la pluie, tout écoulement en surface a pratiquement cessé.*

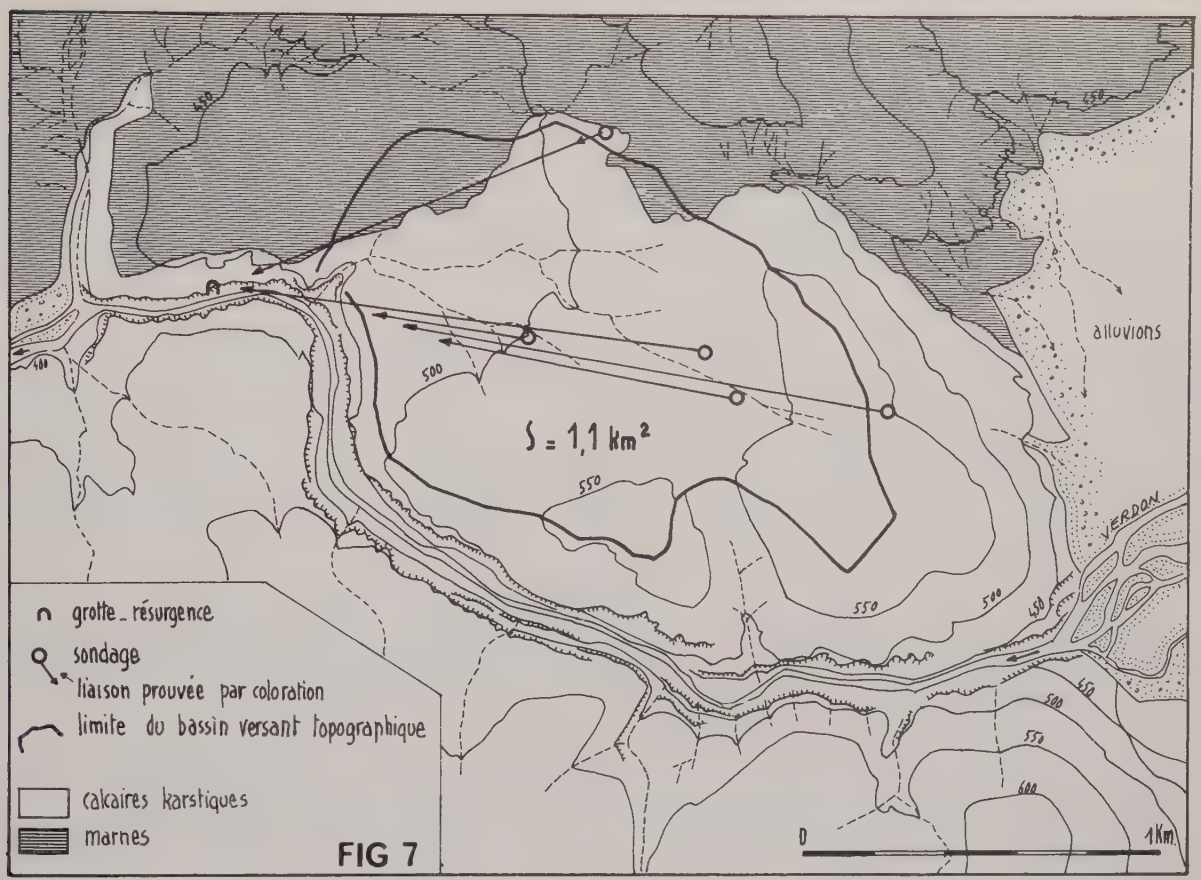


Fig. 7 : LE MASSIF CALCAIRE DE BAUDINARD - Alpes de Haute Provence - France - Réseau hydrographique fossile de surface et drainage souterrain du massif.
Document Electricité de France.

atteignent fréquemment 20 à 30 m (1). Les formes de dissolution dues à la karstification sont extrêmement caractéristiques et très différentes d'un banc à l'autre, mettant en évidence l'influence du faciès pétrographique sur le modelé de surface.

(1) *L'exploration sportive a permis de dépasser (difficilement) la cote -100 dans plusieurs d'entre eux.*

C) Les bassins fermés : exemple le POLJE DE SUECH, Alpes de Haute Provence (France).

C'est une dépression fermée à fond plat, tapissée d'argile et occupée après les pluies par un étang temporaire. Les eaux stockées s'infiltrent ensuite lentement et participent à l'alimentation de sources situées quelques centaines de mètres plus bas dans le versant (photo 2).

Ces poljés, à fond argileux, sont fréquents. Pour certains d'entre eux, l'évacuation des eaux est assurée, en des points bien localisés, par des avens ; il y a alors perte véritable des ruisseaux de surface. Si l'aven n'est pas situé au point bas, il fonctionne en déversoir.

Certains poljés, après des pluies importantes, peuvent devenir de véritables lacs temporaires. Les exemples sont particulièrement nombreux en Yougoslavie où certains sont cultivés en saison sèche et deviennent des lacs en saison humide. Un des plus célèbres en France est le LAC DES AYGAS ou des RIVES (Grands Causses), Salvayre H. (1969). Ses caractéristiques sont les suivantes : longueur : 1250 m ; largeur : 400 m ; profondeur : 5 m ; capacité moyenne : 2,5 x 10^6 m3. De 1933 à 1936, l'eau y séjourna sans interruption ; en 1953 elle resta 6 mois. Ce "lac" occupe un lapiaz en partie colmaté dont le point bas est un aven obstrué par des sables dolomitiques et des éboulis (1).

Les étangs de LEUBOT (fig. 8)(Jura français) illustrent un autre aspect des paysages karstiques. Ce sont des étangs permanents qui présentent la particularité de se situer juste au-dessus d'un réseau karstique pénétrable.

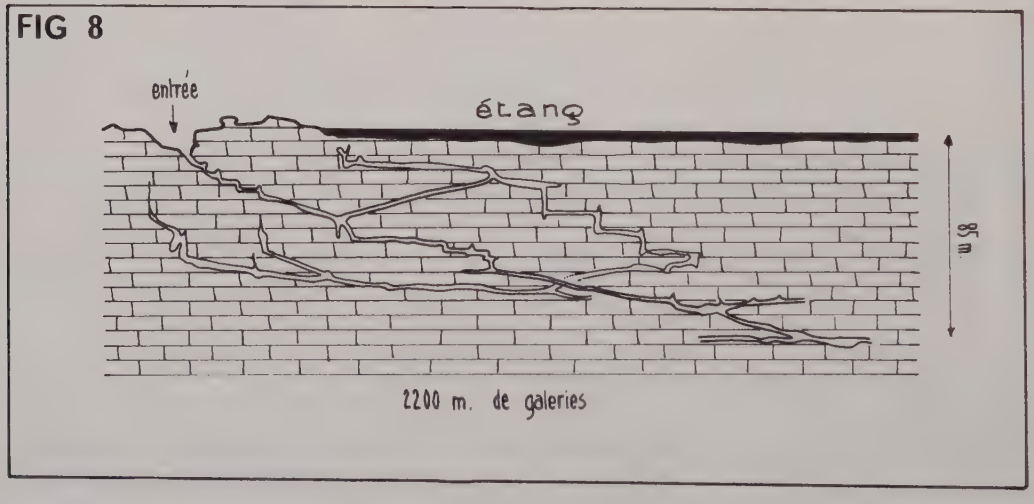


Fig. 8 : GROTTES DES ETANGS DE LEUBOT - Jura - Coupe verticale montrant la position du réseau karstique à la verticale des étangs. D'après Spelunca.

(1) *Il faut noter le rôle joué par les sables dolomitiques qui assurent un colmatage efficace des dépressions karstiques.*

- Commentaires

Les différents exemples cités montrent la morphologie extrêmement variée des zones d'absorption.

Les exemples C) prouvent qu'une présence d'eau temporaire ou permanente en surface n'est pas incompatible avec une karstification même très évoluée du sous-sol. L'étanchéité de surface dépend d'un sol ou d'un colmatage souvent très vulnérable.

L'évacuation des eaux se fait par un ou éventuellement plusieurs avens bien localisés.

L'antériorité du karst par rapport à la couverture qui assure l'étanchéité, paraît une donnée acquise. La couverture actuelle est souvent le reste d'une couverture plus importante. C'est le cas dans la région des GRANDS CAUSSES (France) ; c'est également le cas d'une partie des massifs calcaires qui bordent au Sud le plateau de RIEZ VALENSOLE (chapitre 17). Les cavités karstiques sous-jacentes conditionnent aujourd'hui l'évolution et accélèrent la destruction du tapis étanche si le karst est resté actif.

La dégradation puis la destruction du tapis étanche superficiel multiplient les points d'absorption. La perte unique au départ, privée par la suite d'alimentation, devient souvent fossile. C'est vraisemblablement le cas du GRAND AVEN DE CANJUERS (fig. 3).

En conclusion, il faut insister sur le fait que, si le lapiaz (B) et les dépressions fermées (C) sont spectaculaires et synonymes de karstification, le cas le plus fréquent et le plus intéressant est cependant celui de l'exemple A), c'est-à-dire : fissuration moyenne, lapiaz peu évolué (1).

- Coupes du terrain dans la zone d'absorption (fig. 9)

Les coupes artificielles dans le rocher permettent d'observer, dans certains cas sur plusieurs dizaines de mètres, les caractéristiques et l'évolution de la karstification au-dessous de la surface.

(1) *C'est dans ces régions que sont généralement étudiés et construits les barrages. En effet, lorsque la karstification se révèle spectaculaire (aven, dépression, grotte), le Maître d'Oeuvre donne moins souvent suite à son projet.*

En schématisant, on peut définir les cas suivants (1) :

- lorsque la stratification est nette, les premiers bancs sont complètement désolidarisés de la masse et forment un véritable pavage sur le terrain (photo 3) ;
- si la stratification est très serrée (bancs de moins de 10 cm d'épaisseur), le terrain peut être disloqué à proximité de la surface (photo 5) ;
- lorsque la stratification est nette, la karstification suit le plus souvent un tracé en baïonnette. En d'autres termes, une fissure est karstifiée jusqu'au premier joint stratigraphique; l'écoulement suit alors le joint pour emprunter une autre fissure ;

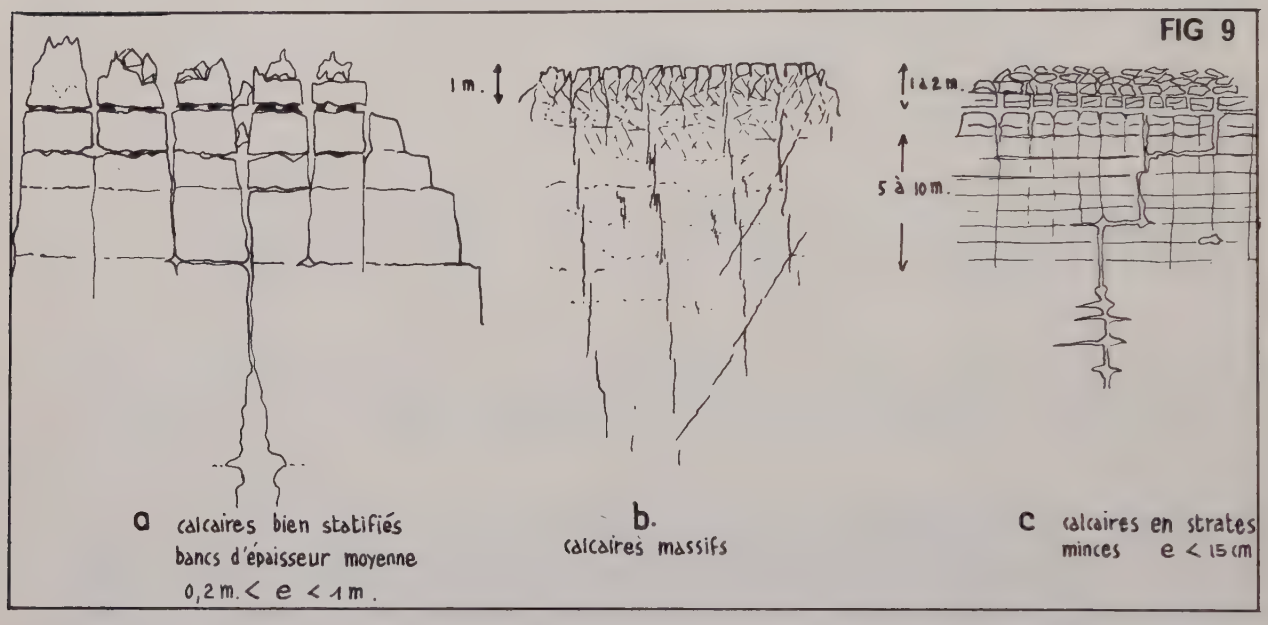


Fig. 9 : INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE SUR LA MORPHOLOGIE DU LAPIAZ.
Dessin d'après photos-documents Electricité de France.

(1) *Il est toujours difficile d'ordonner les observations en fonction d'un seul facteur. La morphologie karstique de la zone superficielle dépend en effet des caractères de la stratification. Par exemple, dans le cas illustré sur la photo n° 5, l'épaisseur des bancs joue un rôle mais également la nature pétrographique de la roche (calcaire marneux à grains fins). Les conditions de genèse sont également importantes : gel, régime des eaux, climat. L'importance de certains facteurs peut, dans certains cas, provoquer des convergences de forme.*

- dans un terrain découpé par un réseau bien marqué de diaclases, la karstification n'intéresse un grand nombre de diaclases que sur une épaisseur très réduite (de 1 à 2 m). Au-dessous, le nombre de diaclases karstifiées diminue très rapidement.

- Commentaires

Le caractère commun à toutes les coupes de terrain, quelles que soient la nature pétrographique et la lithologie, est la diminution rapide (en quelques mètres) du nombre de fissures franchement karstifiées.

Sur un ou deux mètres, la grande majorité des fissures est karstifiée. Au-dessous, sur quelques mètres encore, le nombre de fissures karstifiées est notable. Au-delà, quelques fissures seulement sont nettement élargies par la karstification.

- Conclusion sur la zone d'absorption

En pratique, les types très divers de zones d'absorption qui peuvent être rencontrés conduisent à proposer la classification suivante :

1) les zones pseudo-imperméables : c'est le poljé recouvert par un tapis naturel étanche, permettant l'existence temporaire de lacs ou d'étangs. Ces zones sont peu nombreuses.
2) les zones où l'enfouissement des eaux est localisé : avens, pertes. Ces zones sont également peu nombreuses.
3) les zones à infiltration généralisée. C'est le cas général le plus fréquent.

2.2. LA ZONE DE TRANSFERT VERTICAL

En pays karstique, l'enfouissement rapide des eaux est la règle générale. Cette zone est caractérisée par les grands puits, exemples :

- LE POT II (France, Vercors), 339 m de verticale absolue ;
- LE PUITS DES HIRONDELLES (Mexique), 326 m de verticale absolue.

A LA PIERRE SAINT MARTIN (France), des puits successifs assurent une dénivelée totale de plus de 300 m.

Statistiquement, ces grands puits très spectaculaires sont cependant exceptionnels et l'enfouissement des eaux se fait habituellement par une succession de puits raccordés entre eux par des tronçons horizontaux.

Il est difficile de donner une pente moyenne pour ces cheminements en baïonnette. En première approximation, on peut admettre qu'elle est le plus souvent supérieure à 45°.

- Puissance de la zone de transfert vertical

En région de plateau, la puissance de la zone de transfert ne paraît pas dépasser en moyenne 400 m. En dessous, l'exploration atteint la zone noyée en permanence.

Les cavités records (-1000 m de dénivelée au GOUFFRE BERGER par exemple) paraissent contredire les lignes ci-dessus. L'examen des levers topographiques montre que, en réalité, ces réseaux s'enfoncent parallèlement à un versant montagneux, et que finalement la distance au versant d'air reste inférieure à 500 m.

Ces observations ont conduit certains auteurs, Renault (1969) à envisager dans certains cas une limite inférieure à la karstification qui serait fonction de la charge du massif.

Avant de conclure, il faut cependant noter que la puissance des grandes séries calcaires françaises (Urgonien, Tithonique) est de l'ordre de 300 à 400 m. Au-dessous, les eaux se heurtent généralement à des niveaux imperméables.

Par ailleurs, l'enfoncement en écoulement libre des eaux est également limité par la cote de l'exurgence, c'est-à-dire par la topographie.

Enfin, la prospection et l'exploration font chaque année reculer ces limites ; si les réseaux s'enfonçant à la verticale à plus de 500 m sont encore exceptionnels, il n'en sera peut-être pas de même dans quelques années (1).

- Coupes dans la zone de transfert vertical

La zone de transfert a été recoupée de nombreuses fois par des galeries artificielles. La concentration des conduits, caractère déjà noté à quelques mètres de la surface, s'accentue dans cette zone. Le nombre des conduits se réduit rapidement de telle manière que des galeries artificielles, longues de plusieurs kilomètres et creusées sous des lapiaz très évolués, peuvent traverser le massif sans rencontrer de vides karstiques. Seules de minces fissures argileuses témoignent du phénomène karstique.

Il arrive cependant qu'une galerie artificielle rencontre des cavités karstiques ; il s'agit le plus souvent de puits verticaux formés par élargissement d'une fissure. Ces puits pourraient être pénétrables s'ils n'étaient obstrués dans la grande majorité des cas, par les blocs et les cailloux résultant du tir de mine.

(1) *580 m en Espagne, région de SANDANTER (Spéléo Club de Dijon) ; c'est un magnifique exemple de réseau-type.*
- En Janvier 1972, a été découvert au MEXIQUE un puits de 410 m. de profondeur (sans relai)

Remarque :

La concentration des conduits karstiques ne doit pas être associée à l'idée d'une réduction importante du pourcentage de vides dans la masse calcaire. Les calculs montrent, en effet, que 80 % de vides, même près de la surface, sont formés par les gros conduits (pénétrables ou au minimum de taille décimétrique).

Les coupes artificielles dues aux travaux de génie civil n'ont jamais l'ampleur suffisante pour fournir une vue d'ensemble de la zone de transfert. Seules quelques coupes naturelles d'importance exceptionnelle, telle que la face Nord du MONT GRANIER (photo 6), montrent, dans leur totalité, un système karstique.

Créée par un énorme éboulement au 13e siècle, cette face est une coupe de 350 m de haut et d'un kilomètre de large, dans une masse de calcaires karstiques sensiblement horizontaux.

L'examen de cette face montre que seules quelques grandes fissures karstiques traversent toute la masse calcaire jusqu'à la série marno-calcaire, à proximité de laquelle s'effectue le drainage horizontal des eaux.

2.3. LA ZONE D'ECOULEMENT HORIZONTAL

a)

Après avoir traversé la zone de transfert, les eaux rejoignent une zone, le plus souvent noyée, où l'écoulement est assuré par des galeries sensiblement horizontales. La coupe du réseau de FONTAINE L'EVEQUE (fig. 4) illustre clairement la règle générale qui est l'absence de renseignements sur la majeure partie de cette zone où l'eau est un obstacle à l'exploration.

L'exploration à partir de la résurgence par plongée en scaphandre est évidemment limitée,en profondeur d'abord (-50 m en moyenne pour des équipes très entraînées, -80 m à titre exceptionnel), et également en distance (record 800 m).

Même limitées, ces explorations ont cependant fourni des renseignements fondamentaux,notamment sur de grands réseaux qui sont souvent, par leurs dimensions, les plus pénétrables. (1)

La figure 10 donne la coupe de la partie terminale de deux réseaux.

On constate que, pour ces deux réseaux, le conduit est sensiblement horizontal et se développe quelques mètres au plus au-dessous du niveau de l'émergence.

Si on compare ces conduits avec le réseau exploré de FONTAINE L'EVEQUE (fig. 5), on note que ce dernier, tout en ayant un tracé nettement en baïonnette et s'enfonçant jusqu'à -45 m, conserve une pente générale relativement faible.

Le réseau exploré sur la plus grande distance est actuellement la résurgence sous-marine de PORT MIOU. Pénétré sur plus de 800 m, son tracé est pratiquement horizontal sur 600 m; ensuite un puits vertical abaisse le conduit de 20 ou 30 m.

(1) *320 m. à la Source du LEZ (profondeur 52 m.); exploration rendue difficile par un chaos de 40 m. de long;*
350 m. à FONTAINE L'EVEQUE (profondeur 42 m.)
Plongées du Groupe d'Etudes et de Plongées Souterraines - Marseille.

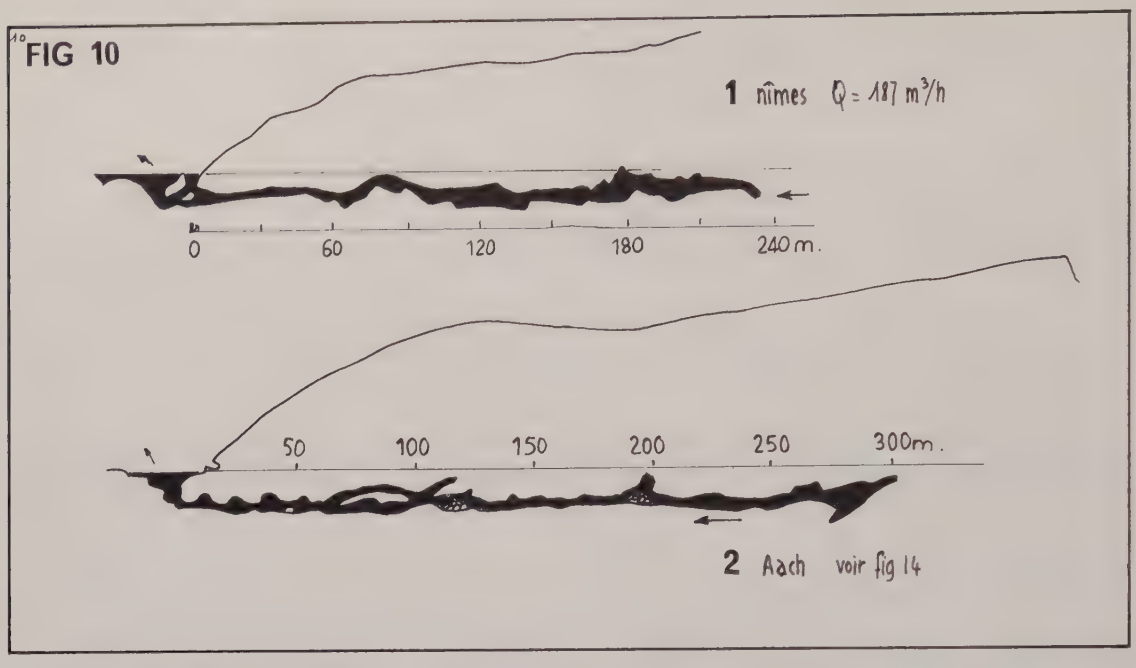


Fig. 10: 1 FONTAINE DE NIMES - 2 SOURCES DE L'AAR - Coupe verticale des réseaux noyés à l'amont de l'émergence.
Documents 1 : (Monteils J.P.) Bulletin de l'Association spéléo. Nimes.
2 : Livret-guide, 5e Congrès International de Spéléo. Stuttgart 1969.

b)

Les explorations par plongée permettent cependant de définir un groupe particulier d'émergences. Il est constitué par les sources alimentées par un puits ascendant presque vertical : FONTAINE DE VAUCLUSE (profondeur 100 m) est le type même de ces sources. On peut également citer en France : SALSES (60 m), GOURNEYRAS (40 m), FONTAINE DES CHARTREUX (40 m), FONTAINE SAINT GEORGES (40 m).

L'exploration en plongée de ces réseaux est évidemment freinée par l'existence même du puits vertical de l'entrée.

Une vue d'ensemble du réseau montrerait peut-être que finalement la pente moyenne du réseau est proche de l'horizontale.

- Hypothèses sur le réseau à l'amont de la zone explorée

L'extension des réseaux à l'amont des sources peut atteindre 30 km et même 46 km (FONTAINE DE VAUCLUSE). Une coloration positive de 130 km a même été réalisée en Turquie, [Bakalowicz (1969)]. Ces chiffres montrent l'ampleur que peut atteindre cette zone des galeries noyées généralement inaccessibles.

Rappelons que la pente hydraulique moyenne dans les grands réseaux est le plus souvent inférieure à 0,5/100.

La pente topographique moyenne des galeries noyées ne peut être que supérieure ou égale à la pente piézométrique. Elle est supérieure si la résurgence sort en mer ou dans un lac par exemple, ou si la source est en charge.

En considérant le réseau par tronçons, on peut envisager que certains tronçons du réseau noyé actif s'enfoncent profondément sous la ligne piézométrique puis remontent en se rapprochant de l'émergence. Cette hypothèse est probable dans le cas, notamment, où la structure géologique implique un tel cheminement (structure synclinale par exemple).

Dans les autres cas, cette hypothèse paraît difficile à étayer. Il paraît plus conforme aux observations de supposer que les galeries noyées (lorsque leur développement est lié au niveau phréatique actuel) se développent sensiblement à l'horizontale, à une distance relativement faible sous le niveau piézométrique (pour donner un ordre de grandeur : entre -10 et -50 m).

En résumé, l'ensemble des observations conduit à proposer, pour définir le réseau karstique, le schéma de la fig. 11.

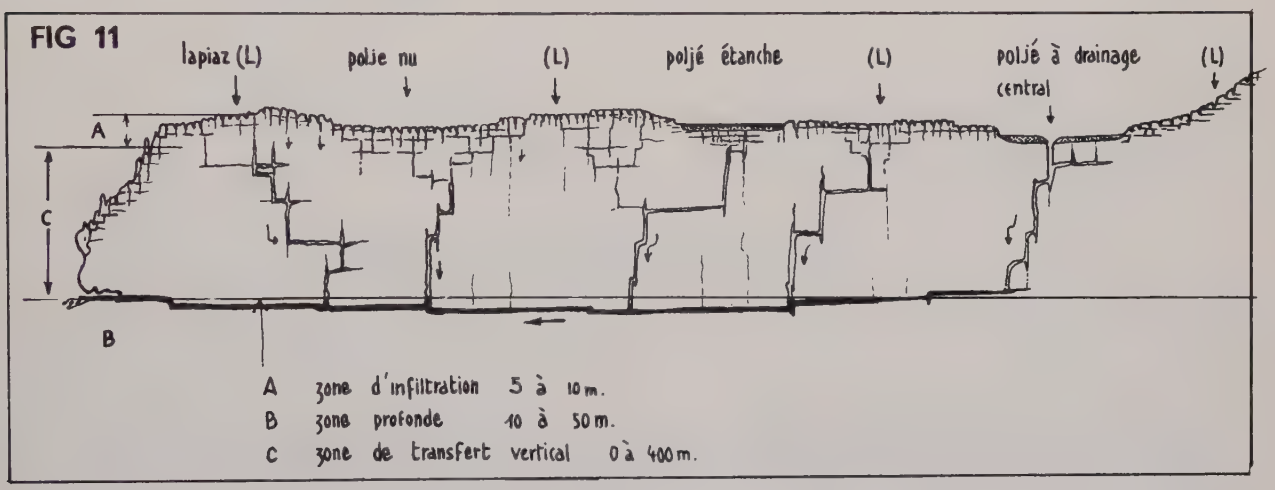


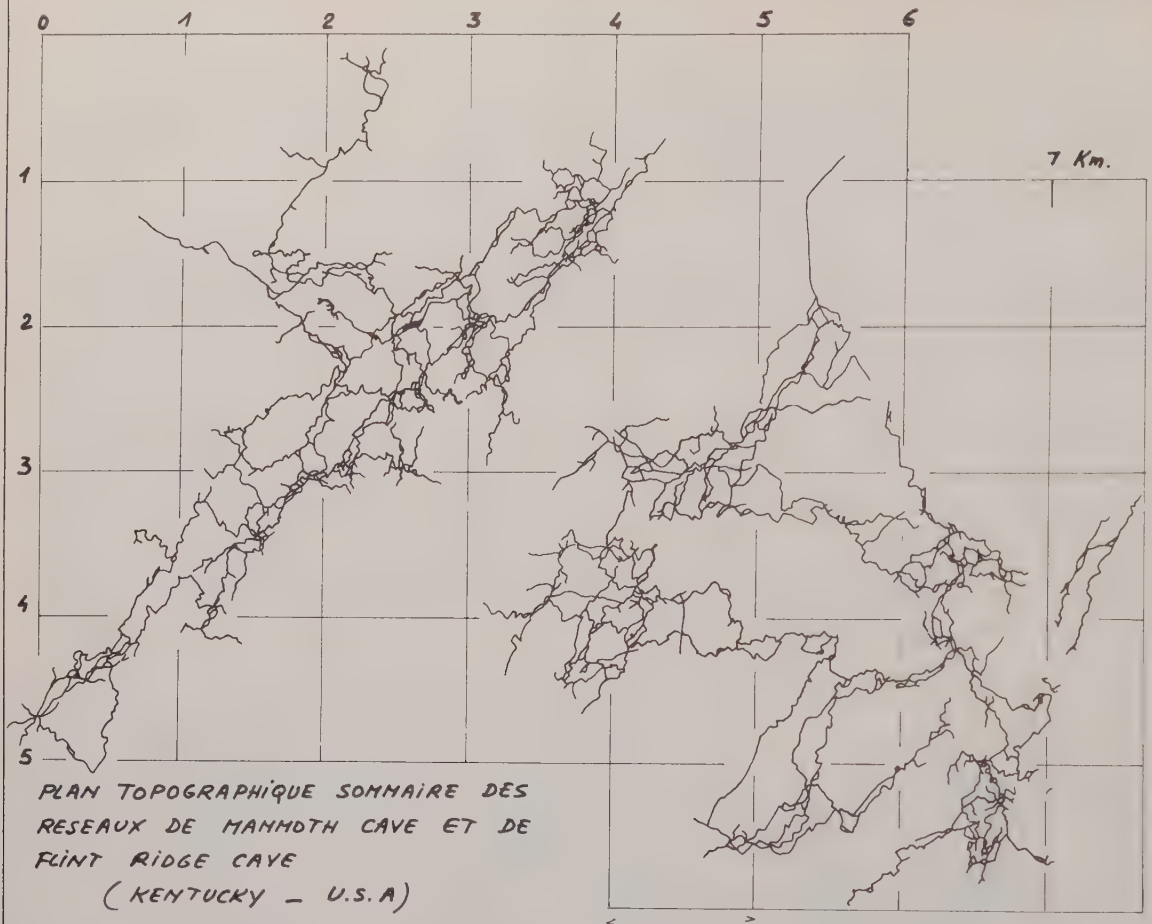
Fig. 11 : Le réseau karstique - Coupe verticale schématique.

3 - MODELE TRI-DIMENSIONNEL D'UN RESEAU

- Caractère tri-dimensionnel des réseaux

Pour les grands réseaux, l'enfouissement rapide des eaux à travers la zone de transfert, entraîne la conséquence suivante : théoriquement, dans la zone profonde où l'écoulement est horizontal, le collecteur ne peut être qu'un système de galeries se développant sous le bassin versant dans toutes les directions.

FIG 12

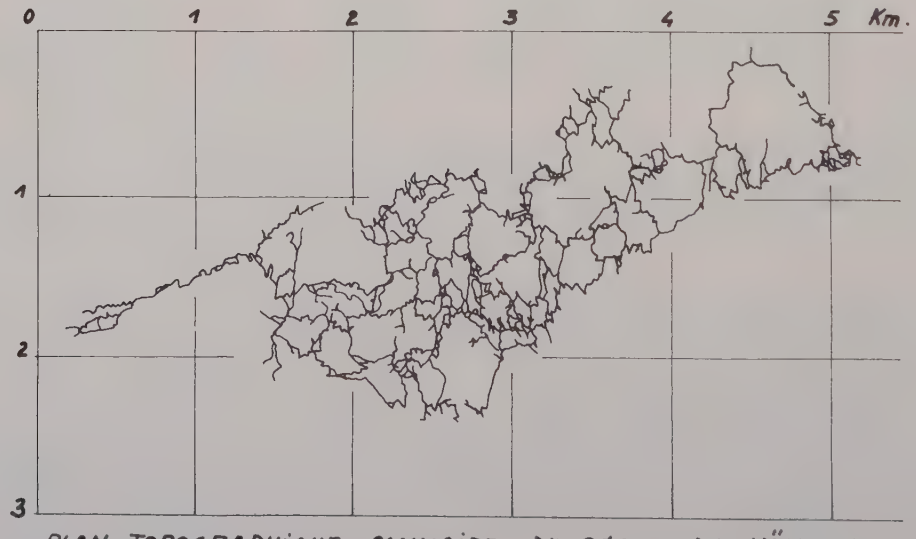


PLAN TOPOGRAPHIQUE SOMMAIRE DES RESEAUX DE MAMMOTH CAVE ET DE FLINT RIDGE CAVE
(KENTUCKY – U.S.A)

D'APRES JAMES. F. QUINLAN (1969) –

CARROYAGE KILOMÉTRIQUE

FIG 13



PLAN TOPOGRAPHIQUE SOMMAIRE DU RÉSEAU DU HÖLLOCH
(SUISSE) (D'APRES A. BÖGLI)
CARROYAGE KILOMÉTRIQUE

Par exemple, supposons une région calcaire tabulaire sans écoulement de surface, à fissuration généralisée. Si la zone de transfert a 400 m de puissance et si l'enfouissement des eaux se fait avec une pente de 45°, cela implique l'existence d'un collecteur horizontal au minimum tous les 800 m.

Cette construction théorique n'est pas en contradiction avec l'observation. Les réseaux géants de HÖLLÖCH ou de MAMMOTH CAVE (fig. 12 et 13) montrent bien l'existence de réseaux horizontaux anastomosés. (2)

Cette remarque montre également que le phénomène de diffluence (sources multiples pour un même réseau) n'est pas une curiosité exceptionnelle mais est une conséquence logique des mécanismes de la karstification.

- Schéma tri-dimensionnel d'un réseau (2)

En partant du schéma en deux dimensions (fig. 10) et en tenant compte des remarques précédentes, le réseau élémentaire tri-dimensionnel peut être considéré comme limité d'une part par un plan supérieur (c'est la surface d'absorption), d'autre part par un plan inférieur (c'est le réseau noyé à écoulement horizontal qui est un réseau anastomosé).

Ces deux plans sont reliés par des puits verticaux peu nombreux qui se ramifient à proximité de la surface.

4 - COMPLEXITE DES CAS REELS - INTERET DES EXPLORATIONS

L'observation des cas réels montre rarement une telle simplicité. Les raisons en sont multiples.

1) Les réseaux peuvent être incomplets; c'est le cas notamment des réseaux de montagne et des réseaux de versant pour lesquels la zone noyée est très réduite.

   C'est également le cas des réseaux cutanés (1) où la zone de transfert n'existe pratiquement pas.

2) Si certains réseaux drainent des bassins versants de plusieurs centaines de km2, d'autres drainent seulement quelques hectares. Il y a donc une question d'échelle.

3) Le réseau karstique doit également s'adapter à la structure géologique (voir chapitre 6). Le schéma élémentaire est alors déformé.

(1) *Les réseaux cutanés sont considérés comme le résultat de la karstification dans des zones périglaciaires. Dans ces zones, seule une tranche de quelques mètres de terrain était dégelée ; au-dessous, le gel interdisait toute circulation d'eau. La karstification s'est donc localisée dans cette zone superficielle.*

(2) *voir note en fin de chapitre.*

4) L'histoire d'un massif calcaire peut comporter plusieurs phases de karstification. Les réseaux se superposent et les plus anciens influencent les karstifications postérieures.

Remarque : Sur chantiers de travaux publics, les travaux au rocher n'intéressent toujours qu'une partie du réseau, la zone d'absorption par exemple pour les travaux peu profonds, la zone de transfert pour les galeries. Ceci explique les idées très différentes qui peuvent être exprimées sur le karst selon l'expérience acquise sur les chantiers.

● INTERET DE L'EXPLORATION DES RESEAUX

L'exploration à partir d'une émergence, fonctionnelle ou fossile, fournit une image du réseau. L'exploration terminée, aussi poussée soit-elle, et quelle que soit l'importance des moyens mis en oeuvre, il est certain qu'une partie des "vides" karstiques, isolés ou colmatés par des remplissages, a échappé aux recherches. Peut-on néanmoins considérer que l'image que l'on a du réseau est représentative de la karstification de la zone prospectée ? Ou, au contraire, la partie explorée ne représente-t-elle, pour prendre une comparaison, que la partie visible d'un iceberg ?

Répondre à cette question est nécessaire chaque fois que l'extension possible d'un réseau karstique peut compromettre l'économie du projet ou le remplissage de la retenue.

Au début des reconnaissances, l'opinion qui prévaudra sur ce problème conduira le Maître d'Oeuvre à engager des travaux plus ou moins importants, à la fin des reconnaissances ,à évaluer les risques de façon différente.

C'est une question difficile et dans une certaine mesure chaque cas est un cas d'espèce.

Par exemple, dans le cadre de l'expérience de FONTAINE L'EVEQUE, pendant une période de 4 ans, les mises en charge successives, naturelles ou artificielles, ont provoqué un lavage des conduits colmatés et entraîné des débourrages. Quelques nouveaux conduits ont été ainsi découverts. On constate néanmoins que l'image du réseau révélée par l'exploration avant tout essai, est restée valable.

Sans vouloir en faire une règle, on peut dire que, dans le cas de réseaux actifs dont le débit est supérieur à 1 m3/s, une exploration directe poussée et bien orientée fournit une image valable du réseau. Par contre, pour les réseaux à faible débit, généralement peu pénétrables, ainsi que pour les réseaux fossiles, les caractéristiques (densité, orientation) de la karstification du massif rocheux seront toujours difficiles à évaluer, quels que soient les moyens mis en oeuvre.

En conclusion, il paraît raisonnable de savoir limiter les moyens mis en oeuvre lorsque le but recherché est uniquement la connaissance du réseau. Par contre, il faut savoir engager des moyens importants lorsque l'on envisage l'installation et l'exploitation d'un dispositif d'observations à l'intérieur d'un réseau. La qualité et la permanence des mesures sont en effet incompatibles avec un accès par trop sportif aux stations.

°
° °

(2) *L'argumentation basée sur l'examen des figures 12 et 13 peut être criticable.*

Le plan topographique d'un réseau peut, en effet, dans une certaine mesure, donner une fausse impression. Les systèmes de galeries d'un même réseau, situés dans des plans superposés, apparaissent évidemment sur les cartes comme un labyrinthe. Seule la représentation tri-dimensionnelle d'un réseau fournit une image réelle de celui-ci. Il se révèle alors beaucoup moins anastomosé que ne le suggèrent les plans. Cependant, avant de conclure, il faut en contrepartie, tenir compte des faits d'observations suivantes :

1) l'examen attentif de la morphologie des systèmes superposés montrent souvent que les conduits aujourd'hui fossiles ont été parcourus par des écoulements libres (ex : réseaux supérieurs de la Caborne - Jura). Ce fait implique que, dans une telle galerie, à chaque point bas, existe, colmaté ou fossile, un conduit qui permettait l'enfoncement des eaux. Ces conduits sont souvent difficiles à repérer si le radier des galeries est recouvert par des dépôts.

*2) Nature des diffluences : le colorant injecté aux pertes de l'Artuby colore les eaux de plusieurs sources situées à plus de 1,5 km. les unes des autres. Ces sources sont d'ailleurs situées dans deux unités structurales différentes. Les relations entre les conduits qui les alimentent se font au-dessous du niveau phréatique (expériences de mise en charge). Ces sources apparaissent ainsi comme des "prises" sur un même aquifère karstique constitué par un réseau maillé. **

3) Décolmatage d'un karst : le lavage approfondi des poches argileuses d'un massif calcaire karstifié (opération réalisée sur les appuis de barrage), ainsi que les décolmatages observés durant les expériences de Fontaine-Levêque montrent que les grands conduits pénétrables ne sont qu'apparemment isolés et sont en réalité reliés entre eux ou court-circuités par un "tissu" de petits conduits impénétrables, souvent très colmatés et localisés en grande partie dans les joints de stratification.

Ces trois exemples montrent que dans la zone noyée, le réseau karstique forme un véritable "tissu" dans la masse calcaire, il apparait également (ce qui est classiquement admis aujourd'hui) comme un réseau comprenant d'une part un ensemble de conduit de taille importante (souvent pénétrable) dans lequel s'effectuent la majeure partie des circulations, d'autre part un réseau de petits conduits qui relie les conduits actifs. Ces conduits secondaires (réseau de liaison) sont normalement non actifs et en grande partie remplis à 90 % par de l'argile.

L'exploration donne donc souvent une bonne image du réseau actif, mais il importe par l'observation de détail de juger de l'importance du réseau de liaison.

* *GEZE (1957) cite un exemple de diffluence spectaculaire; 2 sources distantes de 30 km. (Sources de l'OUYSSE, affluent de la Dordogne et de CORN sur le Célé affluent du Lot) ont été colorées par une même injection faite dans une perte.*

°
° °

CHAPITRE

3

fonctionnement du réseau karstique

PLAN

- Introduction

1 - Les apports

2 - Caractéristiques du régime des eaux karstiques

3 - Fonctionnement théorique du réseau karstique

4 - Perméabilité orientée du massif calcaire

RESUME

Le régime d'une source karstique est le régime des apports, modulé par le réseau.

Les pluies, la neige et les pertes des rivières de surface, représentent les 3 types d'apports possibles. La neige ne permet pas le calcul car il est impossible de connaître la fraction fondue durant chaque unité de temps.

L'eau qui s'infiltre traverse en quelques heures la zone de transfert.

Dans la zone noyée, la vitesse des eaux varie de quelques mètres à 1000 m/h, selon la morphologie du réseau, le débit et la proximité de la source. Lorsque le point d'injection se situe à plus de 1 km de la source, les vitesses moyennes dans les réseaux évolués sont voisines de 100 m/h pour les débits moyens (20 à 30 m/h en période d'étiage).

Dans la plupart des réseaux, la crue s'accompagne d'un engorgement du réseau qui représente un certain stockage (la remontée des eaux peut atteindre 100 m). Les débits d'étiage sont assurés par les réserves et souvent par les pertes en rivière. La localisation des réserves est encore mal connue, le processus de stockage est complexe.

Le fonctionnement théorique du réseau karstique permet de préciser le modèle morphologique du réseau-type, en mettant en évidence l'existence d'une zone tantôt noyée, tantôt dénoyée. En conclusion, le massif calcaire apparaît comme un volume drainé intérieurement par un système très organisé et orienté. Il ne doit en aucun cas être assimilé à un milieu à perméabilité homogène.

KARST FLOW PATTERNS

SUMMARY

The pattern of flow from a karstic spring is the supply pattern as modified by the intervening network.

Rain, snow and losses of streams are the three possible sources of supply. Snow is not amenable to calculation as it is impossible to determine the part that melts per unit time.

Percolating water passes through the transfer zone in a few hours.

Flow speed in the submerged zone varies from a few metres to 1000 metres per hour, depending on the morphology of the system, the flow volume and the distance to the spring. When the point of infiltration is more than 1 km from the spring, mean speeds in well-developed systems are close to 100 m/hour for moderate flows (20 to 30 m/hour in dry-weather periods).

In most networks, floods produce water-clogging of the system which then provides some storage (the water level may rise 100 m). Stored reserves, and often losses of streams, provide dry-weather flow. Where such reserves is located is still not known as the process is complex.

From this theoretical description, a morphorlogical model of a typical system can be further detailed, with a zone that is sometimes submerged and sometimes dry. Limestone finally emerges as a volume drained internally by a system conforming to a definite and well-defined pattern. In no circumstances should it be considered as exhibiting homogeneous permeability.

● INTRODUCTION

Le régime d'une source karstique dépend de deux facteurs :

1) le régime des apports ;
2) la modulation de ces apports par le réseau souterrain.

L'étude du régime de la source, connaissant le régime des apports, est donc un moyen indirect de connaître et d'évaluer les caractéristiques hydrauliques du réseau ; elle permet en particulier de se rendre compte par déduction, de la morphologie de la zone noyée, inaccessible à l'observation directe.

1 - LES APPORTS

Il faut distinguer 3 catégories d'apports :

- les pluies,
- les pertes de rivière,
- la neige et la glace.

Etudier le régime des apports suppose déjà connue la localisation des zones alimentant le réseau karstique. C'est malheureusement souvent une question complexe.

1.1. LE PROBLEME DES BASSINS VERSANTS

Une des caractéristiques des pays karstiques est la non concordance entre le bassin versant topographique et le bassin d'alimentation réel d'une source.

La localisation des zones d'alimentation s'obtient par recoupements successifs à partir du marquage des eaux (colorations à la fluorescéine en général) qui, seul, prouve formellement les liaisons (fig. 3). Elle est précisée également par l'analyse des bilans hydrologiques qui mettent en évidence les zones déficitaires et les zones suralimentées. Enfin, dans certains cas favorables on peut obtenir des informations en observant les réactions des sources à des précipitations naturelles bien localisées. Cependant, dans la plupart des cas, la surface de la zone d'alimentation sera connue au mieux à 10 % près.

Il est donc toujours difficile, en l'absence de frontières géologiques, de situer les limites exactes du bassin versant d'une source karstique. On doit même, dans certains cas, envisager que, pour des apports exceptionnels, un impluvium puisse alimenter un deuxième réseau après saturation du premier.

Cette double incertitude (localisation et surface exacte du bassin versant) sera une première source d'imprécision dans les calculs de bilan.

1.2. LES PLUIES

Chaque bassin versant a des caractères spécifiques. Le régime des pluies dépend du lieu, de l'altitude, du climat et de l'orientation.

La connaissance du régime des apports nécessite d'abord une densité suffisante de pluviomètres. En PROVENCE (France) par exemple, un réseau de pluviomètres implantés à la maille de 10 km, fournit des indications cohérentes en hiver et au printemps. En été par contre, l'intensité particulière de chaque pluie d'orage est mal connue.

D'une façon quasi-générale en hydrogéologie karstique, la donnée la moins bien connue est le volume et le régime des apports. Ce fait est le plus souvent la conséquence d'un sous-équipement du dispositif météorologique.

- Existence d'un "seuil de réponse" : il faut une quantité minimale de pluie pour qu'il y ait modification immédiate du débit de la source.

En PROVENCE par exemple, après une période sèche de quelques semaines, on n'observe aucune variation du débit des sources lorsque des précipitations orageuses sont inférieures à 20 mm environ.

Cette observation est corroborée par deux autres constatations :

1) Lorsque l'on dispose de piézomètres, on constate qu'ils n'accusent aucune remontée du niveau de l'eau après les pluies de faible importance.
2) L'observation directe dans les grottes à faible couverture, ou dans les galeries creusées au rocher, montre également que l'apparition de suintements (goutte à goutte) se produit uniquement lorsque le volume des précipitations dépasse un certain seuil.

- Importance de la fraction infiltrée :

En moyenne annuelle, dans une région où les écoulements superficiels sont nuls ou exceptionnels, 40 à 60 % des apports atteignent le réseau karstique.

En période sèche, ce pourcentage peut être nul ou très faible pour une pluie isolée : 0 à 10 %. En période humide au contraire, 95 % des apports peuvent alimenter le réseau. La fraction infiltrée peut être soit calculée en tenant compte de l'évapo-transpiration, soit évaluée par comparaison entre le volume des apports et les débits restitués. Cette méthode se heurte généralement à la double imprécision évoquée plus haut.

1.3. LES PERTES DE RIVIERES

La perte est un phénomène spectaculaire qui se traduit par la disparition d'un écoulement de surface, dans certains cas en un point bien précis, dans d'autres cas tout le long d'une zone. A l'aval de cette zone, le lit de la rivière est à sec.

On peut proposer le classement suivant :

● 1er groupe : L'eau change de bassin versant

On peut citer comme exemple les pertes du DANUBE qui rejoignent par des réseaux souterrains l'AACH, affluent du RHIN, et gagnent ainsi la mer du Nord, tandis que les eaux de surface s'écoulent vers la Mer Noire.

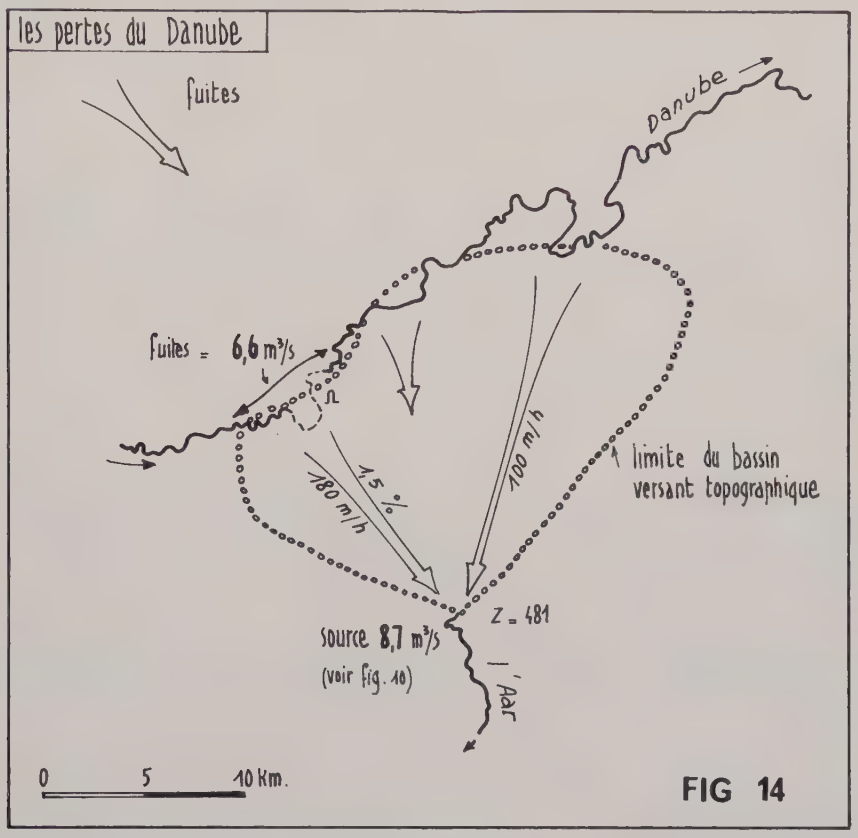


Fig. 14 : PERTES DU DANUBE ET ZONE DE RESURGENCE.
Extrait du livret guide du 5e Internationales Kongress Für Speläologie Stuttgart 1969.

Décelées dès 1719, les pertes du DANUBE commencèrent à être étudiées en 1884. Entre 1884 et 1950, les infiltrations augmentèrent régulièrement (en 1921, par exemple , la perte est totale pendant 309 jours) ; à partir de 1950, l'accroissement du volume des pluies provoqua une diminution du nombre de jours de perte totale. C'est en 1877 que KNOP prouva l'alimentation par le DANUBE, des sources de l'AACH, en utilisant comme marqueur des sels d'uranium.

● 2e groupe : L'eau d'un affluent rejoint directement la rivière principale par un trajet souterrain

C'est un phénomène très fréquent qui peut même être considéré comme caractéristique des pays karstiques. Par exemple, fig. 3, les eaux de l'ARTUBY, affluent du VERDON, n'atteignent le confluent que durant les périodes de crues ; le reste de l'année, elles s'infiltrent par les fissures du lit et participent à

l'alimentation de FONTAINE L'EVEQUE. Le trajet souterrain en ligne droite est supérieur à 25 km.

- 3e groupe : Pertes et résurgences se produisent dans la même rivière

Il faut noter que ce phénomène peut exister avec des gradients inférieurs à 7 ‰. Ex : le VERDON, l'HERAULT (France).

- Le régime des pertes en rivière

Généralement, les capacités d'absorption des zones de pertes sont limitées et les débits absorbés varient peu. Aussi, les sources karstiques alimentées en partie par des pertes de rivière ont-elles des fluctuations de débits réduites et un débit d'étiage non négligeable.

Les pertes en rivière présentent en outre la caractéristique d'être généralement facilement mesurables.

Règle pratique :

Lorsqu'une source karstique présente un régime peu fluctuant et un débit d'étiage non négligeable, il importe (en particulier dans les pays où les saisons sont très tranchées) de rechercher si l'alimentation n'est pas partiellement assurée par des pertes de rivière.

Dans les pays karstiques où le climat présente une saison sèche bien marquée, cette recherche doit être pratiquement faite pour toutes les sources pérennes.

1.4. LA NEIGE ET LA GLACE

Dans les pays froids et dans les pays de montagne, les précipitations sont en grande partie stockées sous forme de neige et de glace. Elles sont redistribuées d'une façon lente à la fonte des neiges. Dans ces conditions, la relation régime des précipitations-régime des débits n'existe pratiquement pas.

2 - CARACTERISTIQUES DU REGIME DES EAUX KARSTIQUES

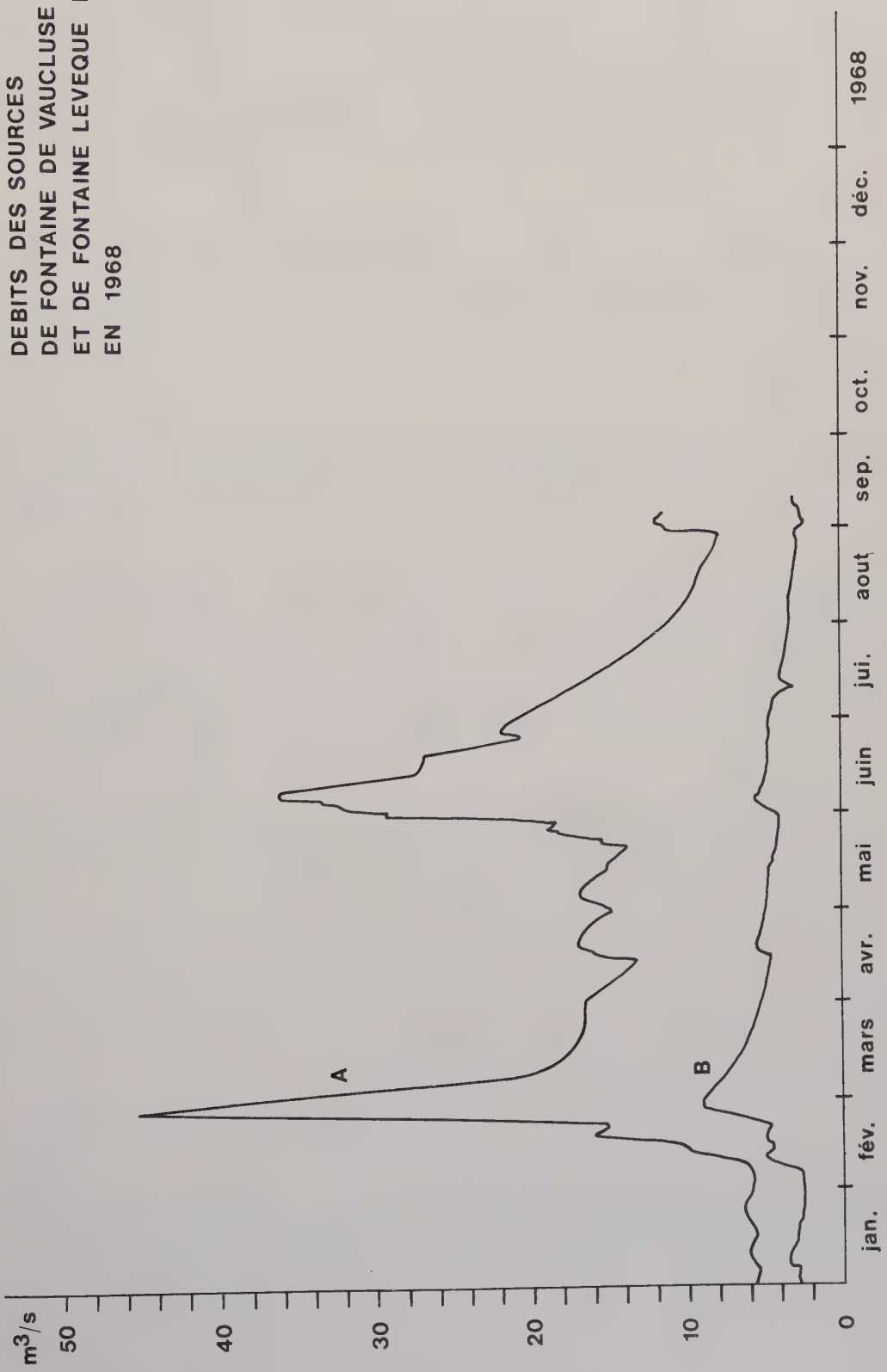
2.1. LES OBSERVATIONS

Le graphique, fig. 15, donne le débit des sources de FONTAINE L'EVEQUE et de FONTAINE DE VAUCLUSE pour l'année 1968.

Ces courbes sont caractéristiques du régime des sources karstiques : crues très brutales, décrues d'abord rapides puis plus lentes. Ce régime est celui

FIG 15

DEBITS DES SOURCES
DE FONTAINE DE VAUCLUSE A
ET DE FONTAINE LEVEQUE B
EN 1968



de 90 % des sources karstiques (1) lorsque les précipitations tombent sous forme de pluie. Cette analogie entre les courbes montre l'importance de la modulation par le réseau karstique des apports qui peuvent être très différents.

● Vitesse de réaction à une précipitation

• Début de la crue à la source : après une précipitation supérieure au seuil de réaction, la crue s'amorce quelques heures après l'orage (ex : FONTAINE L'EVEQUE 9 h ± 1 h). Dans le cas cité, la régularité du phénomène est remarquable.

• Modification du niveau de l'eau dans la zone noyée : si on dispose de piézomètres, on constate une remontée de la nappe de fissures (ex : massif de BAUDINARD fig. 7). Après un orage bien localisé, les piézomètres commencent à réagir 7 h à 11 h 30 après le début de la pluie. Pour un massif donné, le temps de réaction ne varie pas avec la profondeur du niveau de l'eau dans chaque piézomètre, mais dépend de l'épaisseur moyenne du terrain au-dessus de la zone noyée. Dans le cas du massif de BAUDINARD, la couverture verticale varie de 10,75 à 149 m.

• Apparition de suintements en galerie profonde : quelques heures après les pluies, on constate généralement l'apparition des suintements en galerie. Le temps de réaction est égal au temps moyen que mettent les apports pour atteindre la zone noyée.

● Les vitesses d'écoulement

Les essais de coloration, destinés le plus souvent à mettre en évidence l'extension du bassin versant, fournissent également des renseignements sur la vitesse de l'eau dans les réseaux karstiques.

Exemples :

- Région nord-montpelliéraine :(Paloc,1967)
  pour 64 colorations, vitesses mesurées de 2 à 500 m/h :
  5 essais ont donné des vitesses supérieures à 100 m/h
  7 essais ont donné des vitesses inférieures à 10 m/h

- Plateau karstique de MEJANNES-LE-CLAPS (injection dans les avens)

distances en mètres	6650	8200	6700	2300
vitesses	44 m/h	25 m/h	24 m/h	15 m/h

(1) *Il existe également quelques rares sources "intermittentes" : ce sont des sources dont les débits présentent des variations régulières pouvant aller du simple au double. La période du phénomène peut être de quelques minutes.*

- Massif de BAUDINARD (essais EDF)
  vitesses de 30 à 125 m/h (injection en sondages) ; distance 1,2 à 4 km.
- CABORNE DE MENOUILLE (essais EDF) (fig. 6)

vitesses	185 m/h	400 m/h	670 1100 m/h	530 m/h	540 m/h
distances	1150 m	3000 m	1300 m	3000 m	3000 m

- Réseau de FONTAINE L'EVEQUE (essais EDF)

distances	12,5 km	30 km	30 km
vitesses	200 m/h	106 m/h	56 m/h (étiage ?)

Les résultats obtenus sont finalement très dispersés. Ces chiffres sont en effet des chiffres bruts ; avant de les classer, il est nécessaire de tenir compte de plusieurs facteurs. (1)

1°) Rapport distance réelle-distance en ligne droite : l'exploration spéléologique montre que le cheminement souterrain n'est pas une droite. Le cheminement réel de l'eau est supérieur à la distance mesurée en ligne droite. Les vitesses citées sont donc inférieures aux vitesses réelles. On peut évaluer à 1,4 ou 1,5 le coefficient de correction des vitesses brutes.

2°) Conditions d'injection : l'injection dans des avens en envoyant de l'eau ou dans des écoulements très faibles (période d'étiage) conduit généralement à des vitesses faibles. Il y a un effet de vasque. Le colorant progresse dans des galeries à écoulement libre où l'eau cascade de vasque en vasque, le débit étant négligeable par rapport au volume des vasques. Il y a à la fois dilution et freinage.

Par contre, les injections dans la zone noyée, à partir de sondages, semblent donner des valeurs moyennes valables.

Vitesses moyennes : en corrigeant les chiffres bruts et en sélectionnant les plus significatifs, on peut admettre les valeurs moyennes suivantes :

- en zone noyée (point d'injection situé à plus de 1 km de l'émergence) :
  $20 \text{ m/h} < V < 200 \text{ m/h}$
- en zone noyée (point d'injection situé à moins de 1 km de l'émergence) :
  $50 \text{ m/h} < V < 500 \text{ m/h}$.

A proximité des émergences, dans les conduits bien individualisés, on observe des vitesses souvent égales ou supérieures à 1000 m/h.

Ex : A FONTAINE L'EVEQUE, sur 400 m, les vitesses moyennes atteignent 1 à 2 m/s soit 3600 à 7200 m/h. Localement, sur des étranglements, la vitesse dépasse 3 m/s.

(1) *A partir de 40 colorations sélectionnées, GEZE (1957) donne les valeurs suivantes - vitesse moyenne 95 m/h - maximale 600 m/h - minimale 1,5 m/h, en soulignant la variabilité de la vitesse dans un réseau en fonction du débit. Les nombreuses mesures effectuées ces 10 dernières années, tout en les précisant, ne font que confirmer ces valeurs moyennes qui paraissent donc comme très significatives de l'hydrodynamique des eaux karstiques.*

En période de crues, les vitesses dans la zone noyée varient comme de débit (1) ; elles peuvent donc être multipliées par 5 ou plus. La conséquence de telles vitesses est examinée dans les paragraphes consacrés aux mécanismes d'érosion (chapitre 6).

Remarque : A l'échelle du massif karstique, avant tous travaux, les vitesses élevées sont exceptionnelles et transitoires (période de crues). Mais il est par contre très fréquent que les travaux d'injection aient à maîtriser des circulations rapides après le remplissage d'une retenue.

● L'ennoyage du réseau en période de crues

L'ennoyage, en période de crues, de certaines parties du réseau accessibles à l'étiage, est un phénomène bien connu et redouté des spéléologues.

Quelques chiffres :

- Dans la rivière souterraine de SAINT VINCENT (Pyrénées), pour un débit passant de 1 à 20 m3/s, la remontée de l'eau est de 55 m.
- Sur le RIEUTORD, la remontée de l'eau peut atteindre 65 m au TROU FUMANT de l'OLIVIER (Causses nord-montpelliéraines).
- Sur le LIROU, après les pluies, la remontée de l'eau atteint 40 m à l'aven de la BARAQUE (Causses nord-montpelliéraines).
- Dans le VERCORS, après des pluies importantes, l'ennoyage des réseaux dépasse 100 m.
- Dans le réseau du HOLLÖCH (Suisse), l'ennoyage peut également dépasser 100 m.
- Dans la REKA (Yougoslavie), la remontée de l'eau atteint 170 m.
- Enfin, la mise en charge maximale est évaluée à 350 m dans la grotte de la LUIRE (Drôme, France).

Cet ennoyage correspond à un engorgement du réseau provoqué par l'augmentation brutale des apports. Le niveau se stabilise lorsque la mise en charge, conséquence de l'engorgement, permet aux conduits karstiques d'évacuer un débit égal au débit des apports.

Discussion :

Dans le cas d'observation directe, il faut envisager la possibilité de pseudo-mises en charge. En effet, l'observation de la remontée de l'eau peut avoir deux causes.

Cas n° 1 : Il y a effectivement engorgement remontant du réseau à partir de la zone noyée par excès des apports en écoulement libre sur les débits transités dans les galeries noyées. Il y a alors remontée générale de la surface libre dans le collecteur principal et dans les affluents. Il est alors possible de définir une surface piézométrique (fig. 16A).

(1) *La vitesse de 9 m/s a été mesurée dans certains tronçons de rivière souterraine.*

Cas n° 2 : L'ennoyage de certains puits est dû à un bouchon semi-perméable ou à une capacité de débit très faible des fissures terminales. L'eau remonte dans le puits, mais à l'aval, l'écoulement redevient temporairement libre (fig. 16B). Il n'y a aucun rapport direct entre $\Delta H'$ mesuré et Q à l'émergence. A la limite, le cas des lacs temporaires, du type du lac des AYGAS (chapitre 2), illustrent ce fait.

En pratique, les grands ennoyages, de plus de 100 m par exemple, ne doivent être reliés qu'avec prudence aux débits mesurés aux émergences.

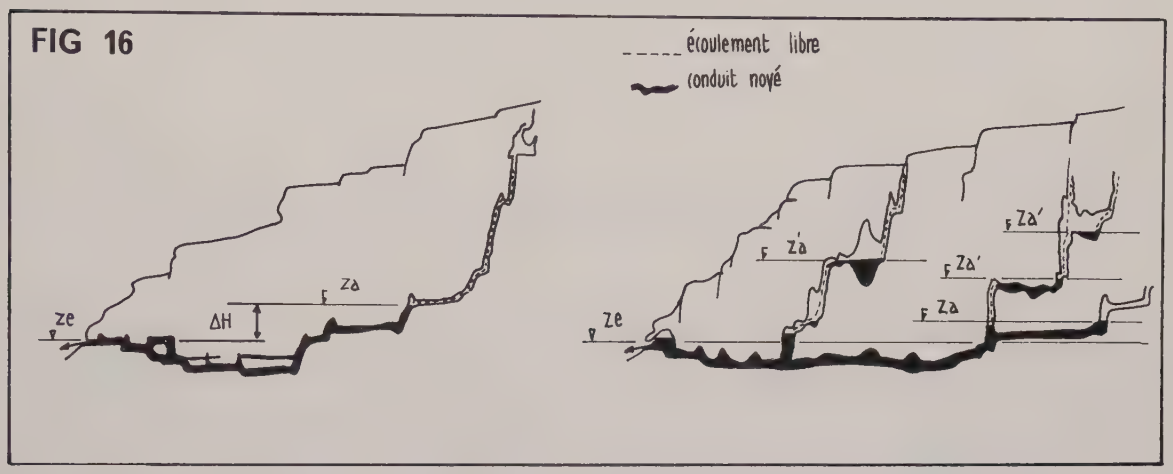


Fig. 16 : Véritable mise en charge et pseudo-mise en charge.

- Le stockage

Une autre conséquence fondamentale de la mise en charge est le stockage. La mise en charge correspond à un engorgement du réseau, c'est-à-dire à une accumulation d'eau. Il y a remplissage de tous les vides situés au-dessous du niveau piézométrique, à l'exception des cloches d'air mises en pression, dont le volume est vraisemblablement très faible.

2.2. EXEMPLES DE RESEAUX

- La CABORNE DE MENOUILLE (fig. 6 et 17)

Deux ruisseaux souterrains visitables existent à l'intérieur du réseau ; les colorations 1 et 3 (fig. 6) montrent que ces ruisseaux participent à l'alimentation de la source de la PORCHERIE. Cette dernière reçoit également des eaux plus lointaines (colorations 2, 4, 5) circulant à un niveau plus profond (fig. 6). En période de pluies, le débit de la source augmente, l'eau remonte dans le puits du P15. Le réseau bas est alors noyé (fig. 17). Dans les galeries supérieures, les arrivées d'eau se multiplient et grossissent le débit des ruisseaux souterrains.

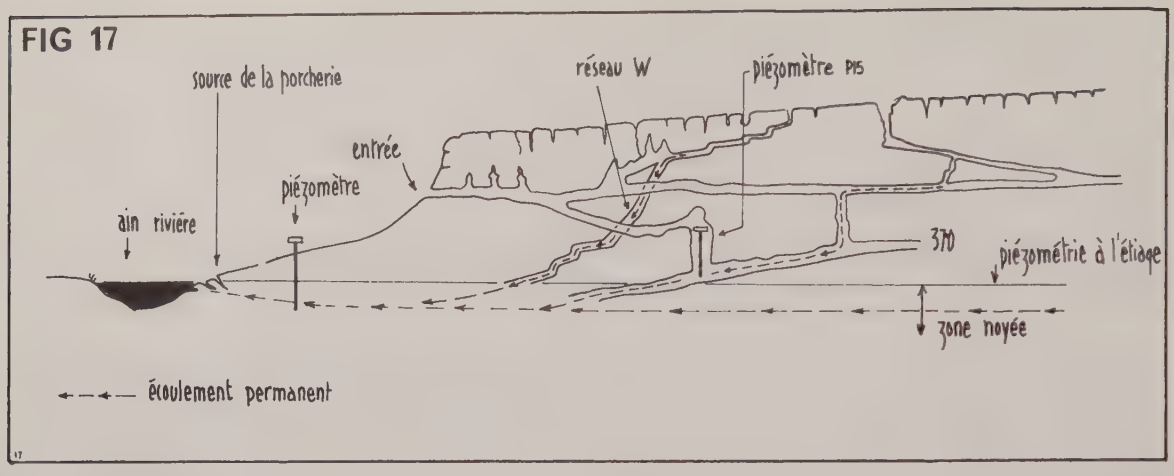


Fig. 17 : LA CABORNE DE MENOUILLE - Circulations pérennes et dispositif de mesure de la piézométrie dans le réseau et à l'extérieur.

On peut admettre que la hauteur de l'eau dans le P15 mesure la charge piézométrique entre la source et le P15. Si H est la hauteur de l'eau dans le P15, Q = f (H - Ho), Ho étant la cote de la source, soit 330 environ. La mise en charge dépasse alors une quarantaine de mètres.

- La source de FONTAINE L'EVEQUE (fig. 3, 4, 5)

Le régime de cette source est particulièrement régulier ; le débit varie de 3 à 10 m3/s en année moyenne. Ce débit est alimenté par des précipitations et des pertes en provenance des rivières de l'arrière pays.

Le cours souterrain de FONTAINE L'EVEQUE a été dévié en 1968 dans des conduites forcées munies de vannes. Il est donc possible d'arrêter le débit et de mesurer la pression statique qui s'établit en arrière des vannes (fig. 18).

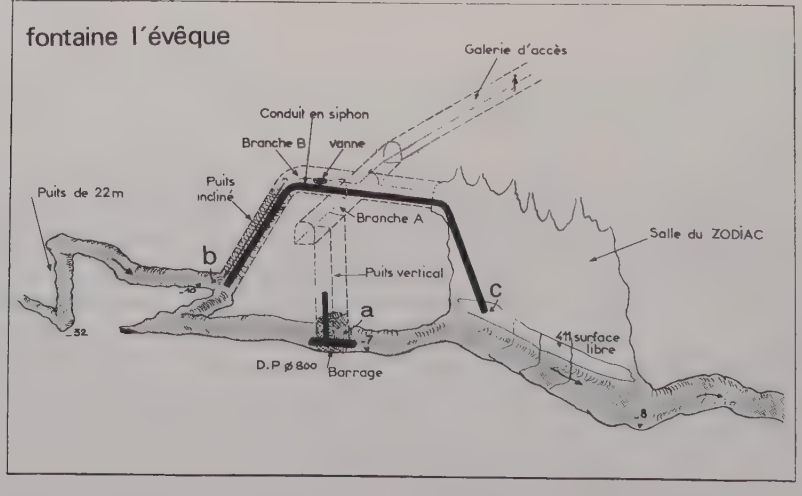


Fig. 18 : FONTAINE L'EVEQUE - Schéma du dispositif de fermeture.

Ce dispositif permet de constater les faits suivants :

1) La montée de la pression après fermeture est très rapide (quelques minutes).

2) A un débit donné, correspond une pression donnée. L'écoulement est en charge ; il est possible d'écrire

$$Q = f(\Delta H)$$

Les mesures faites montrent que l'équation :

$$Q\ m3/s = \alpha \sqrt{\Delta H}$$

fournit une bonne approximation du débit pour :

$\alpha \neq 1,1$ et ΔH en mètres.

2.3. SYNTHESE

L'étude générale des réseaux (chapitre 2) a permis de distinguer 3 grandes zones caractérisées par des données morphologiques très nettes ; les observations hydrauliques superposent à ce schéma un schéma plus complexe où l'on peut distinguer (fig. 19) :

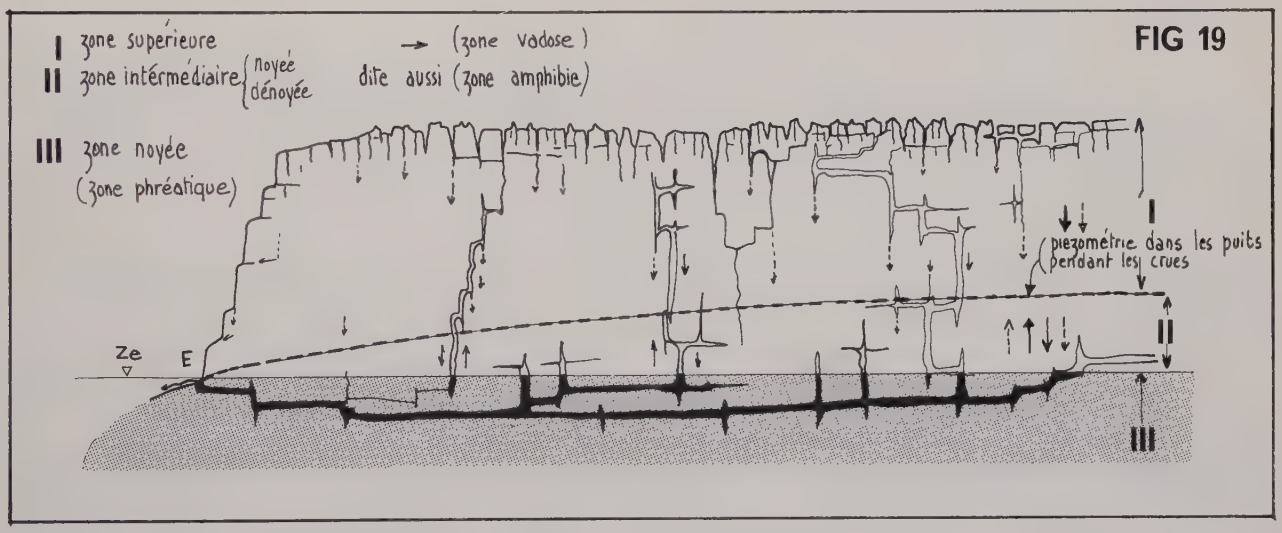


FIG 19

Fig. 19 : IDENTIFICATION DES DIFFERENTES ZONES DU RESEAU KARSTIQUE d'après les observations hydrodynamiques.

1) une zone supérieure I toujours dénoyée où l'écoulement des eaux est libre sauf localement.

2) une zone inférieure III où toutes les fissures sont occupées par de l'eau. Cette zone, dans sa définition la plus restrictive, est limitée vers le haut par le plan horizontal de cote Ze passant par l'émergence.

3) une zone intermédiaire II tantôt noyée, tantôt dénoyée, limitée vers le haut par une surface variable correspondant à la cote de la remontée des eaux dans le réseau et vers le bas par le plan Ze.

● Différences et similitudes entre les 2 schémas

Le schéma : zones d'absorption, de transfert, d'écoulement horizontal, est basé sur l'observation de caractères morphologiques précis et facilement reconnaissables. Cette morphologie est l'aboutissement de l'histoire morphogénétique du massif. Dans un réseau colmaté fossile, il est toujours possible de définir ces différentes zones.

Le schéma hydraulique, au contraire, découle de l'hydrodynamique actuelle du réseau. Il décrit un état transitoire : un éboulement ou un décolmatage pourront faire varier la cote de la zone noyée, une variation des apports modifiera la zone noyée-dénoyée. Il est bien évident que si les conditions hydrologiques sont stables, les zones "hydrauliques" prendront à la longue des morphologies caractéristiques.

Dans beaucoup de cas, le schéma hydraulique se superpose en partie au schéma morphologique. La zone supérieure I correspond à la zone d'infiltration A et à une partie de la zone de transfert C . La zone inférieure III comprend la partie de la zone profonde B située au-dessous de Ze.

La zone intermédiaire II comprend une partie de la zone profonde B et une partie de la zone de transfert C .

Compte tenu de l'importance de la zone intermédiaire, il paraît, pour tous les réseaux actifs, logique de compléter le schéma du réseau défini à partir des considérations morphologiques en rajoutant entre la zone de transfert et la zone profonde une zone appelée zone noyée-dénoyée, définie non pas à partir de critères morphologiques mais à partir du fonctionnement hydraulique du réseau.

Cette nouvelle zone est caractérisée par une grande activité de la karstification. Les caractères propres aux zones dénoyées et aux zones noyées peuvent y être superposés. L'analyse morphologique est généralement délicate.

3 - FONCTIONNEMENT THEORIQUE DU RESEAU KARSTIQUE

● Introduction

Rappelons que le régime d'une source karstique est le régime des apports modulés par le réseau karstique.

Pour que la comparaison du régime des apports extérieurs et du régime à l'émergence soit un moyen de connaissance des caractéristiques du réseau, il faut que les hypothèses servant à choisir le modèle tiennent au maximum compte des observations morphologiques et hydrogéologiques effectuées dans les réseaux, et que les résultats ne soient pas en contradiction avec ces mêmes observations.

A ces seules conditions, l'analyse du régime de la source est un moyen d'approche du milieu karstique.

3.1. ETUDE DU REGIME

La figure 15 fournit deux exemples des courbes Qe = f (t) avec Qe = débit à l'émergence. Cette courbe Q = f (t) est l'hydrogramme classique ; c'est généralement la seule courbe disponible par mesure directe, avec la courbe des apports extérieurs bruts. Elle se décompose en deux parties : une partie ascendante : période de crue, une partie descendante : période de décrue ; cette partie de la courbe est appelée aussi courbe de tarissement.

• Etude de la courbe de tarissement

Cette courbe de tarissement a été étudiée par de nombreux auteurs. Un excellent historique de cette question est fait dans "Une méthode d'approche de l'analyse d'une source karstique" par J.P. Tripet (1969).

• Historique

La recherche d'une formulation mathématique, compte tenu des phénomènes observés, a conduit la plupart des auteurs à adopter au départ la formule de Maillet :

$$Q = Qo \exp. (- \alpha t) \quad (1)$$

ainsi que la formule :

$$Q = Qo/(1 + \alpha t)^2 \quad (2)$$

avec :
Q = débit au temps t
Qo = débit au temps to = 0
α = coefficient de tarissement

Pour obtenir une courbe théorique voisine de celle enregistrée, il est souvent nécessaire d'additionner plusieurs courbes du type (1) ou de combiner des courbes des types (1) et (2) ayant des paramètres différents.

L'équation Q = Qo exp. (- α t) correspond à la vidange d'un réservoir à travers un bouchon poreux (Roche 1963). Elle correspond également à la vidange d'une nappe captive en régime laminaire ou à la vidange d'une nappe libre dont la surface varie peu pendant la vidange.

Pour H. Schoeller (1967), le coefficient α peut s'écrire :

$$\alpha = aK/me\ X$$

avec K = coefficient de perméabilité en Darcy
a = constante
me = porosité effective dynamique
X = longueur de la nappe

Dans la réalité, on constate effectivement une diminution de la valeur de α avec le tarissement ; cette diminution est liée d'après Schoeller au fait que le régime est de plus en plus contrôlé par des fissures de plus en plus fines avec le temps. D'où la méthode consistant à décomposer l'équation Q = f (t) en une somme limitée de termes.

Ce bref résumé permet de faire un certain nombre de remarques.

1. Cette approche essentiellement mathématique permet de prévoir avec une bonne précision les variations du régime de la source compte tenu de l'état antérieur.
2. Elle fournit peu de renseignements sur le réseau ; elle n'aborde pas en particulier le problème de la localisation du réservoir dont la vidange va assurer le débit.

- Etude de la courbe de crue Qe = f (t)

La similitude d'allure d'un grand nombre d'hydrogrammes entre eux a souvent été signalée. Ils diffèrent uniquement par le rapport débit maximum/débit moyen (ce rapport peut varier de 2 à 20 et plus) ainsi que par la vitesse de décrue. Cette décrue est généralement d'autant plus rapide que le rapport précédent est plus élevé. Le caractère le plus constant est néanmoins la brutalité de la crue qui est visible, quelle que soit l'échelle des temps, sur tous les diagrammes.

- Existence d'une mise en charge

L'étude morphologique des réseaux montre que, dans la plupart des cas, en amont de l'émergence se développe un réseau bien calibré fonctionnant en écoulement noyé (fig. 20).

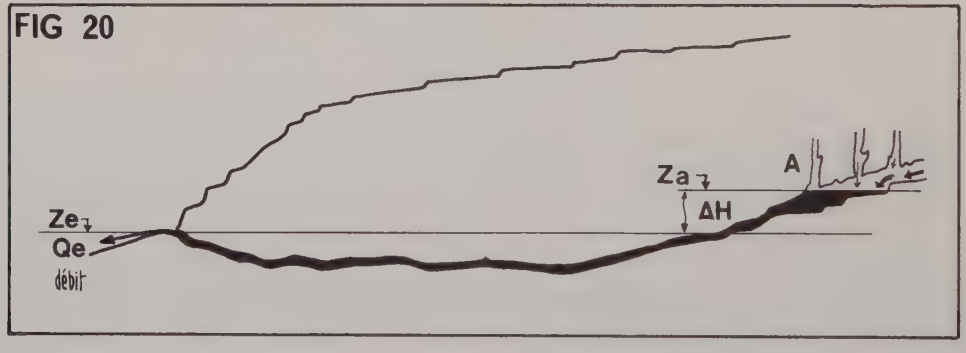


Fig. 20 : SCHEMA DE LA MISE EN CHARGE.

Dans le conduit noyé, pour une section donnée S et une vitesse V, en première approximation le débit à l'émergence Qe est :

$$Qe = S.V \quad \text{(équation 1)}$$

V varie donc comme Qe.

Cette vitesse V est créée par une mise en charge ΔH ; on est en droit d'écrire

$$V = f(\Delta H) \qquad (2)$$

d'où l'on tire : $Qe = S.V = S.f(\Delta H)$ (3)

Cette déduction élémentaire faite à partir de la variation des débits en conduite forcée est vérifiée par l'observation (voir paragraphe 2.2.) et par la mesure.

$Qe = K\sqrt{\Delta H}$ fournit dans certains cas une approximation valable du rapport reliant Qe et ΔH.

Rappelons que cette mise en charge correspond à un engorgement du réseau lorsqu'il y a excès des apports par rapport au débit capable d'être évacué à l'émergence.

● Définition de la courbe QA = f (t)

L'ensemble des observations effectuées sur la morphologie des réseaux permet de proposer l'étude du fonctionnement du réseau à partir du modèle ci-après (fig. 21), dérivé du schéma fig. 19.

Définitions :

e : émergence
Ze : cote de l'émergence, c'est la seule valeur fixe

A un instant T quelconque, on a :

Qe : débit à l'émergence
A : "voûte mouillante", début de la zone noyée vers l'aval, c'est un point mobile qui se rapproche de e à la décrue
a : points d'arrivée secondaires dans la zone noyée
Za : cote de A
Za-Ze = ΔH : perte de charge dans le conduit noyé entre A et l'émergence
L : longueur de la zone noyée
Qa : débits en écoulement libre aux points a
Ap : apports extérieurs
N.P : niveau piézométrique

A l'instant t1, début de la crue, Qe augmente d'après l'égalité (2), V augmente d'après l'égalité (3), ΔH augmente, il y a engorgement du réseau. Cet engorgement est dû à l'arrivée aux points a et A des eaux de précipitation.

Par définition, on appellera $QA = \Sigma qa$, le débit total arrivant dans la zone noyée à l'instant t.

Rapport entre QA et Qe : à l'instant t :

si $QA > Qe$, il y a engorgement, donc crue
si $QA < Qe$, il y a tarissement

Conséquence : pendant la crue, il y a constitution d'une réserve correspondant à l'engorgement des réseaux.

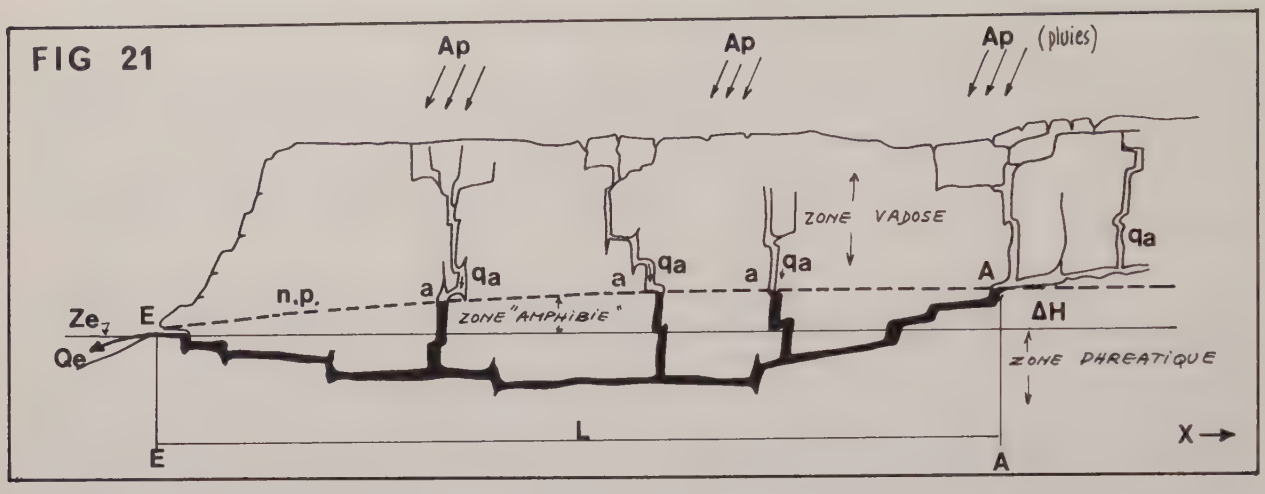


Fig. 21 : MODELE DE RESEAU pour l'étude de l'hydrogramme d'une source karstique.

Etude de la courbe QA = f (t) (fig. 22)

La courbe QA = f (t) n'est en pratique jamais connue. Dans certains cas, on peut connaître qa en quelques points (1). On peut cependant dans une certaine mesure, situer la courbe QA par rapport à Qe.

L'équation Qe = f (ΔH) implique que, entre t1 et t2, H augmente, par conséquent :

$$QA > Qe$$

Pour t = t2 : QA = Qe

Pour t > t2, H diminue, QA < Qe

En résumé, la courbe QA = f (t) est donc au-dessus de la courbe Qe entre t1 et t2, et au-dessous entre t2 et t3. La courbe QA présente donc un maximum M (QA) situé entre t1 et t2. La position de M (QA) est inconnue.

- Etude de la surface S1

Supposons la courbe QA connue ; pour t = t3, le régime est identique au régime initial, il y a retour à l'état antérieur.

On peut considérer que pour t = t3 :

$$\int_{t1}^{t3} Qe = \text{volume d'eau apporté par la crue} = \int_{t1}^{t3} QA$$

(1) *C'est le cas par exemple lorsqu'on peut accéder à certaines parties du réseau et mesurer les débits dans des affluents en écoulement libre.*

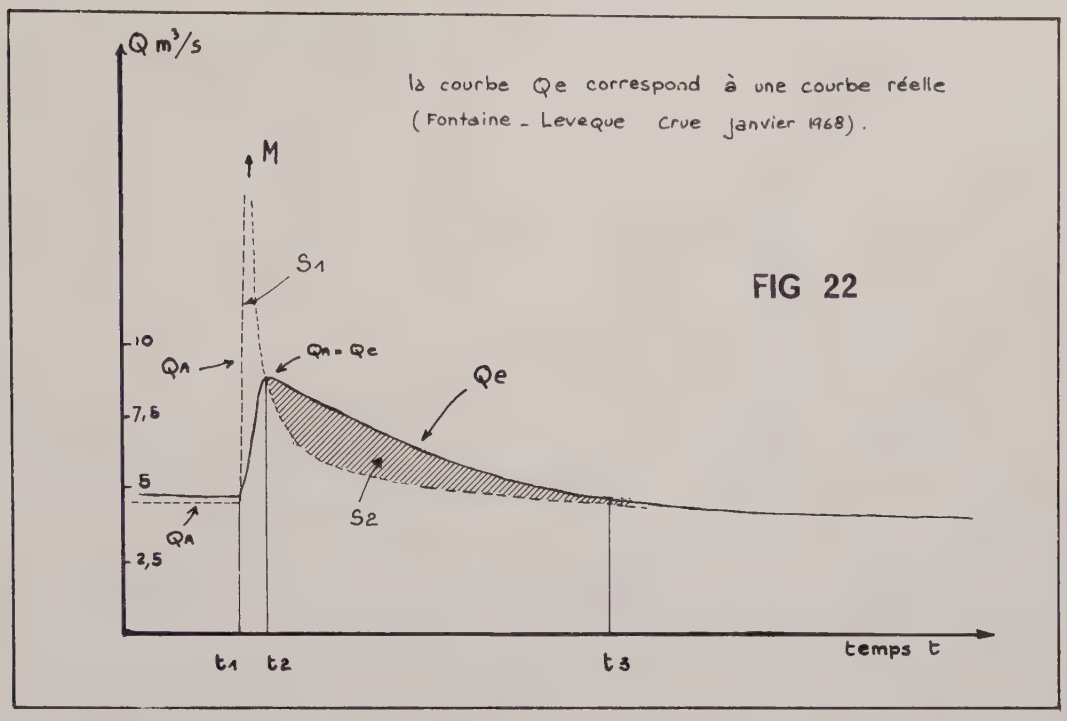


Fig. 22 : EXEMPLE D'HYDROGRAMME D'UNE SOURCE KARSTIQUE.
Construction de la courbe QA à partir de la courbe Qe.

Les courbes QA et Qe délimitent 2 surfaces : S1 et S2 :

S1 correspond à $\int_{t1}^{t2}$ (QA - Qe) : c'est le <u>débit stocké par engorgement</u>

S2 = $\int_{t2}^{t3}$ (Qe - QA) : c'est le volume fourni par le <u>déstockage pendant la décrue</u> ;

par définition S2 = S1.

3.2. LES CAS REELS

- <u>Sources dont le débit moyen est inférieur ou voisin de 25 1/s</u>

L'hydrogramme le plus fréquemment enregistré est celui représenté par la figure 23. Il est caractéristique de la majorité des sources c'est-à-dire de celles dont le débit d'étiage est faible et dont le bassin versant ne dépasse pas quelques km2.

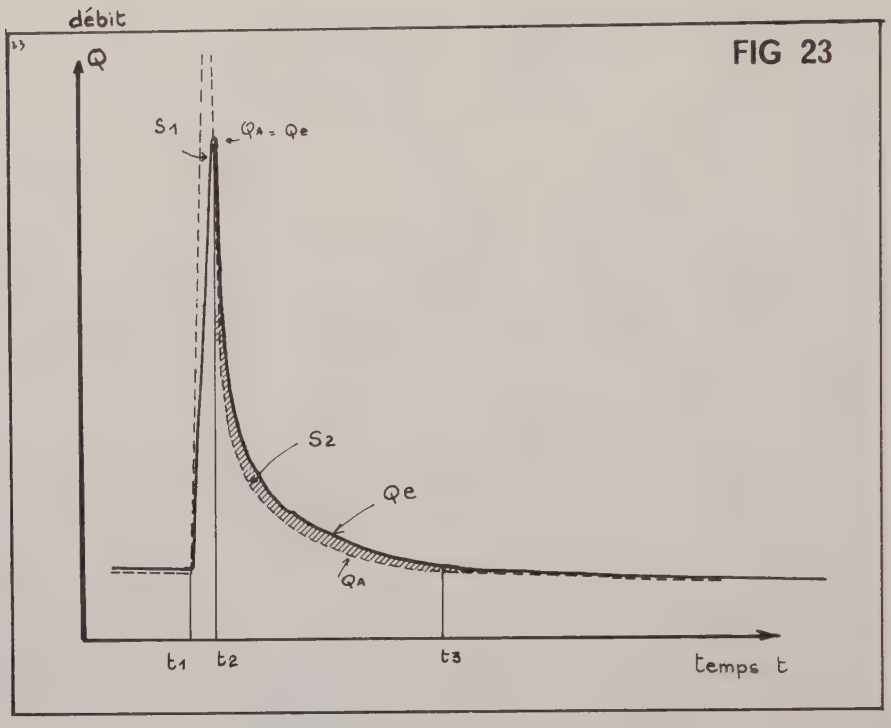


Fig. 23 : EXEMPLE D'HYDROGRAMME D'UNE SOURCE KARSTIQUE.
Exemple d'une crue brutale.

La courbe Qe est caractérisée par des crues brutales et importantes. La décrue est également rapide. La courbe QA ne peut être que plus aiguë que Qe. La construction graphique montre que la courbe QA est pratiquement confondue avec la courbe Qe. Par conséquent, le stockage est très réduit (S1 petit) et le transfert très rapide.

On a donc : $QA \not\equiv Qe$

Ces déductions rejoignent l'observation : la brutalité des crues des torrents souterrains à écoulement libre a en effet souvent été observée par les spéléologues et représente, d'ailleurs, un danger sérieux.

Exemples :

1. Gouffre Georges : "le débit est passé en un instant de quelques 1/s à plus de 1 m3/s, il devait demeurer constant au moins 2 h", Spelunca (1970).
2. Le chorum des Aiguilles - S.C. Gap, Spelunca n° 4 (1970) : "Deux violents orages avaient éclaté en surface vers midi. Vers 15 h (à -370) nous entendions un sourd grondement qui allait crescendo. Brutalement 30 secondes plus tard, une trombe d'eau et de pierre s'abattait sur les échelles du puits. Nous devions attendre 14 h que l'eau veuille bien baisser".

- Intérêt de la courbe QA lorsque QA ≠ Qe

Considérons le schéma suivant : fig. 24

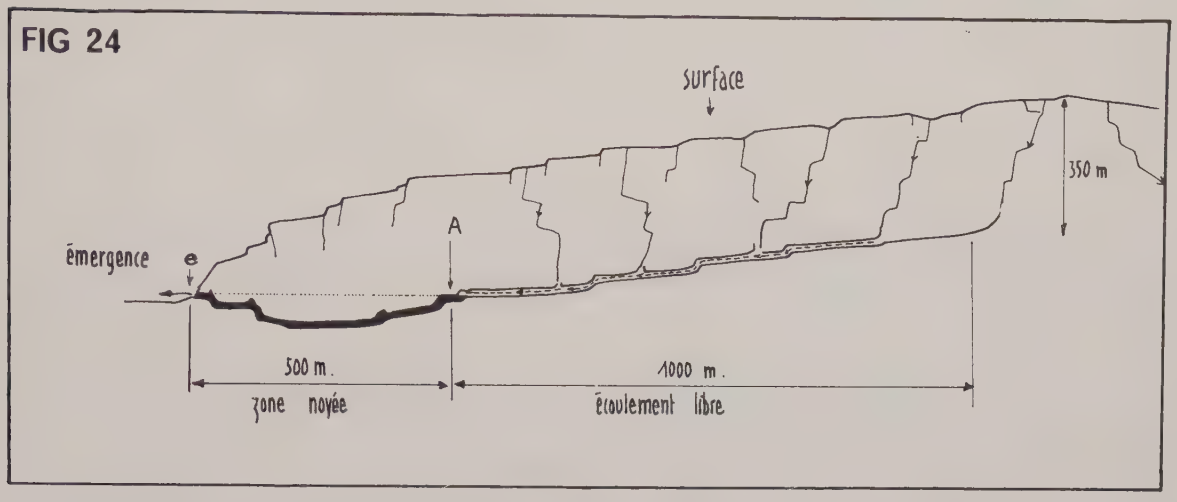


Fig. 24 : SCHEMA DE RESEAU - Longueur respective des conduits en écoulement en charge et des conduits en écoulement libre.

QA est le régime des eaux arrivant en A.

Donnons l'ordre de grandeur des différentes parties du réseau :

- D'après le tableau, fig. 2, chapitre 1, sur 455 sources pérennes, 396 ont un débit inférieur à 25 1/s, c'est-à-dire un bassin versant inférieur à 2 km2 compte tenu des débits spécifiques locaux.
- Par conséquent, la distance e X sera le plus souvent inférieure à 1,5 km.
- Si e A est voisin de 0,5 km, A X est ≠ 1 km.
- Pour les réseaux évolués, la vitesse moyenne des eaux souterraines a été évaluée à 150 m/h. Le temps moyen de transfert entre X et A serait de 3 h environ.
- En conséquence, dans la plupart des cas, la courbe Qe, qui est très voisine de QA, est caractéristique de la modulation du régime des apports résultant du transfert vertical.

Remarque : Cette déduction est conforme aux observations directes sur la rapidité des infiltrations entre la surface et la zone noyée : quelques heures.

● Les sources importantes

Les grandes sources dont les débits dépassent plusieurs centaines de litres/seconde et même plusieurs m3/s, ont des bassins versants qui peuvent dépasser 500 km2. La distance e X atteint alors plusieurs dizaines de km. L'hydrogramme des ces sources permet de faire des déductions intéressantes sur les réseaux profonds.

● 1er cas : $QA \neq Qe$

La figure 25 présente l'hydrogramme d'une crue de printemps de la source de FONTAINE L'EVEQUE. La construction, suivant les règles données, de la courbe QA conduit à dessiner une courbe dissymétrique présentant un véritable point de discontinuité en A.

Si on reprend le schéma fig. 24, on doit admettre que la courbe QA obtenue est influencée par la modulation provoquée par la zone A X.

En fait, il faut raisonner en 3 dimensions :

Le schéma fig. 26 est une représentation simple en 3 dimensions du réseau où l'on retrouve les zones définies sur la fig. 24.

On peut écrire :

$$QA = \Sigma\, qa \text{ (zone SeA)} + \Sigma\, qa \text{ (zone SAX)}$$
$$= QA1 + QA2$$

La courbe QA1 est une courbe uniquement modulée par la zone de transfert ; elle sera semblable à la courbe QA construite dans le cas où $QA \neq Qe$ (fig. 23).

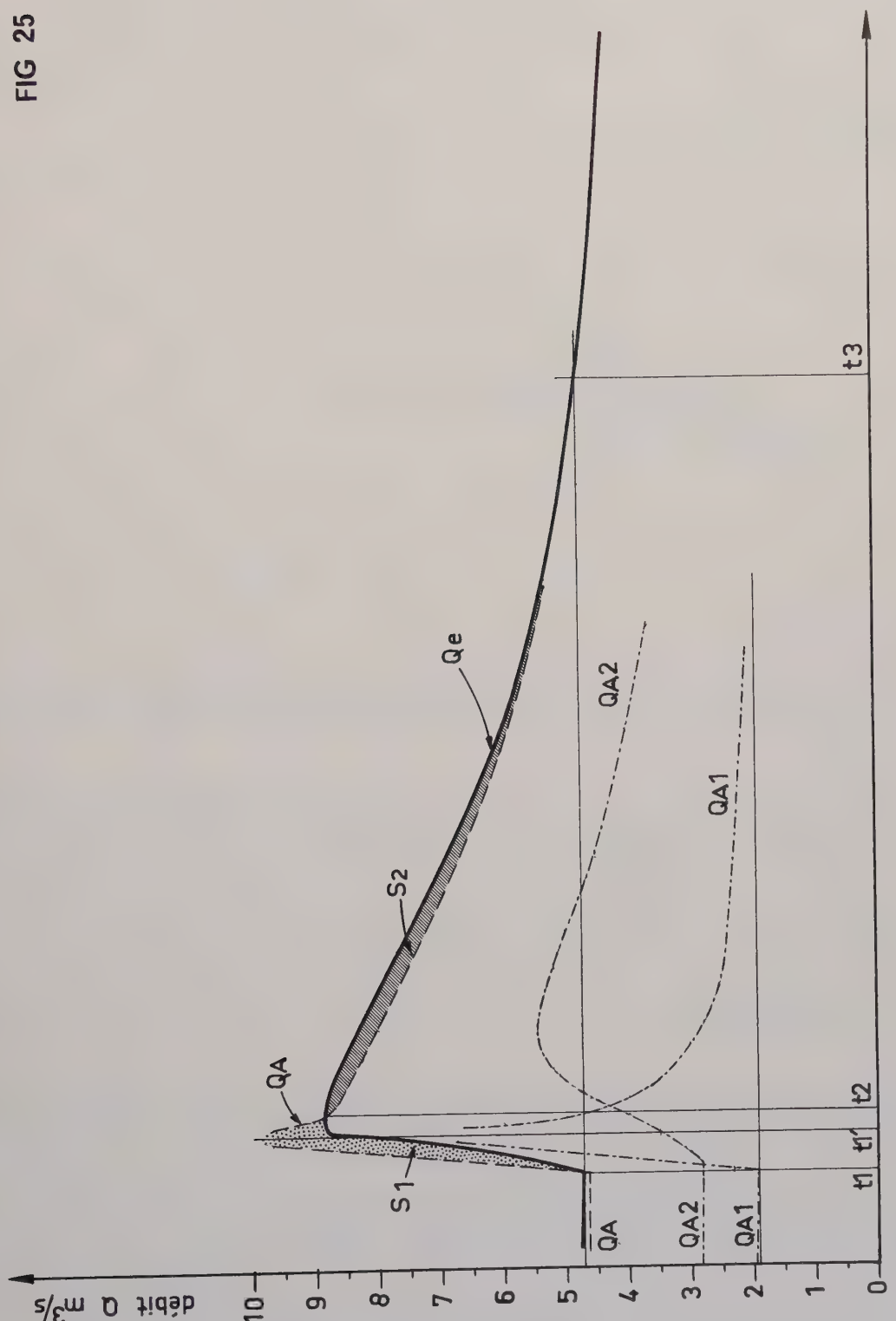
Construction de QA1 :

Pour $t < t1$: $QA = Qe - \varepsilon$

On peut, pour simplifier, supposer que QA1 et QA2 sont proportionnels à leurs bassins versants, c'est-à-dire à SEA et SAX. Entre t1 et t1', la pente de la courbe QA1 est comprise entre la pente de Qe et de QA. Par analogie avec la courbe QA de la fig. 23, on peut construire la courbe de décrue de QA1. La courbe QA2 sera obtenue par différence entre QA et QA1.

La courbe QA2 présente un maximum très décalé par rapport au maximum de la crue. Ce décalage est d'autant plus grand que le bassin versant est plus étendu.

FIG 25



FONTAINE-LÉVÊQUE - HYDROGRAMME D'UNE CRUE DE PRINTEMPS - CONSTRUCTION DE LA COURBE QA -

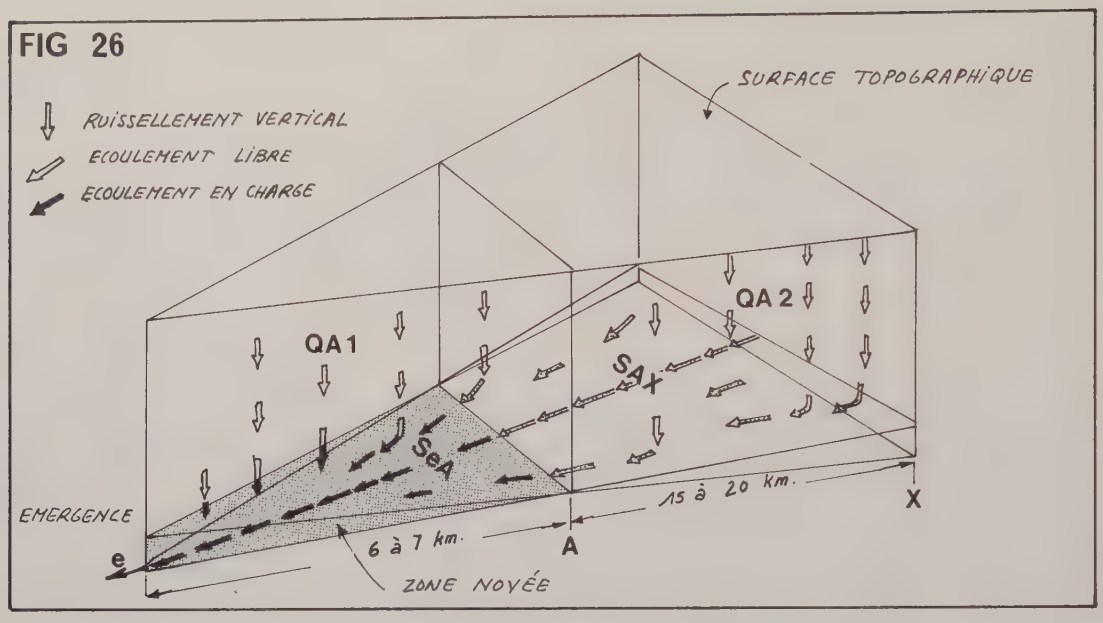


Fig. 26 : SCHEMA TRI-DIMENSIONNEL DU RESEAU.

- 2e cas : $QA \neq Qe$

Pour les sources de débit important , dont l'hydrogramme de crue est semblable aux hydrogrammes des sources de faible débit moyen, la construction de QA donne $QA \neq Qe$.

Pour ces sources dont le bassin versant est très grand, l'influence de la zone SAX ne peut être négligeable que si cette zone est réduite. En d'autres termes, cela signifie que la zone noyée est importante.

Cependant, il n'y aura crue brutale que si la capacité de stockage, dans la zone située au-dessus de la zone noyée, n'est pas trop importante. Dans ce dernier cas, en effet, il n'y aurait pas engorgement.

3.3. LES DEBITS D'ETIAGE

Dans la plupart des cas, 2 à 3 mois au maximum après une crue, l'hydrogramme présente une courbe à faible pente, asymptote à une droite sensiblement parallèle à l'axe du temps.

On doit distinguer deux groupes de courbes (fig. 27) :

1) Un premier groupe pour lequel cette droite est confondue avec l'axe des X ; le débit tend alors vers zéro (fig. 27A).
2) Un deuxième groupe pour lequel cette droite (fig. 27B) est nettement distincte de l'axe des X ; la source paraît susceptible de rester pérenne durant une période de sécheresse de très longue durée.

Les sources du premier groupe sont les plus nombreuses. Beaucoup de sources, même spectaculaires, présentent des débits d'étiage très faibles et ne sont pérennes que grâce à des apports fréquents. Une sécheresse de 3 mois paraît souvent capable de les tarir.

Les sources du deuxième groupe semblent disposer d'une capacité de réserve beaucoup plus grande qui doit être régie par des mécanismes hydrauliques différents de ceux qui contrôlent les débits de crue.

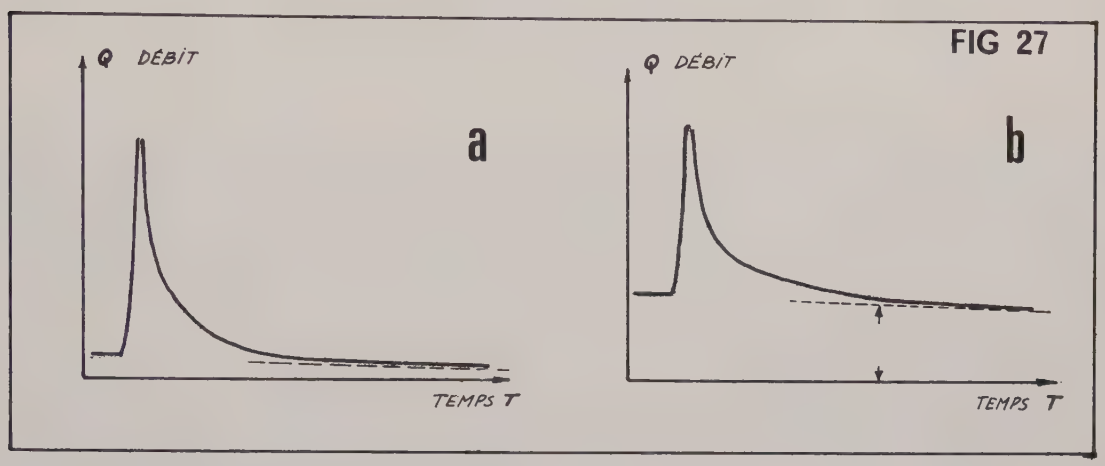


Fig. 27 : EXEMPLES DE COURBES DE DECRUES. Valeur du débit d'étiage.

● Identification des eaux d'étiage

Avant d'aborder le problème de la localisation des réserves et des mécanismes de stockage et de redistribution, il faut vérifier l'origine des eaux quand la courbe de décrue est du type B.

Chaque cas est un cas particulier. Exemples :

1) FONTAINE L'EVEQUE : Célèbre par sa régularité (débit annuel moyen 5,7 m3/s, débit d'étiage 2,3 m3/s), FONTAINE L'EVEQUE est en fait alimentée en partie par les fuites de l'ARTUBY, du JABRON et du VERDON qui assurent plus de la moitié des débits d'étiage.

2) Les sources de SAINT MAURIN qui sont les seules sources importantes dans le grand canyon du VERDON, ont un régime extrêmement caractéristique des sources karstiques avec des crues et des décrues spectaculaires et brutales ; ce sont cependant des sources pérennes même en année de grande sécheresse. L'étude détaillée de leur zone d'alimentation a montré que leur débit d'étiage est en grande partie assuré par les pertes du ruisseau de VALONGE dont les eaux s'infiltrent en totalité en période sèche, pour rejoindre le réseau karstique alimentant SAINT MAURIN.

3) En pays de montagne, la pérennité de nombreuses sources karstiques est due uniquement à la fonte des glaciers et des névés.

4) Il existe, par contre, des sources karstiques dont l'alimentation est en totalité assurée par des réserves souterraines. La plus célèbre est FONTAINE DE VAUCLUSE (1). Pour un bassin versant de 1500 km2, les débits suivants ont été mesurés (m3/s).

	étiage	maximum
1966	6,61	54
1967	4,09	20,74
1968	5,28	44,60

Pour FONTAINE DE VAUCLUSE, on obtient donc un débit spécifique d'étiage voisin de 3 1/s/km2. Ce chiffre peut servir de référence pour les sources karstiques de la même région. Des chiffres nettement supérieurs sont souvent l'indice d'une alimentation par pertes de rivière (par exemple pour FONTAINE L'EVEQUE, située dans le même contexte géographique, les débits d'étiage sont voisins de 4 et 5 1/s/km2).

3.4. LES RESERVES KARSTIQUES

Une modulation des apports implique que se réalise, dans le massif, un stockage de volume important et de longue durée. En effet, 12 h après un orage, 90 % des eaux qui rejoindront le réseau sont dans le terrain. Dans le cas des sources pérennes, ces eaux stockées assurent le débit durant toute la période sèche, déduction faite de la partie du débit assuré par les pertes de rivières.

• Localisation et capacité des réserves

Observations : en période d'étiage, la visite du réseau naturel montre que des arrivées d'eau (par stalactites, fissures, condensation, ou même petit ruisseau) existent dans la zone de transfert près de la surface. Dans les grottes situées sous quelques dizaines de mètres de couverture, on observe encore des suintements goutte à goutte, même à la fin de la période sèche (2). Il faut des sécheresses exceptionnelles (ex : 1968/1969 dans le Sud de la France) pour constater un véritable assèchement de cette zone de couverture.

(1) *L'alimentation partielle de FONTAINE DE VAUCLUSE par la DURANCE est une hypothèse qui n'a jamais été, à notre connaissance, démontrée.*

(2) *Le phénomène de condensation bien connu dans les tunnels artificiels a été observé dans des réseaux karstiques ventilés (réseaux de montagne). Mais ce mécanisme ne peut être évoqué pour les réseaux sans circulations d'air (certains réseaux étant même isolés de l'extérieur par des voûtes mouillantes).*

A) On peut donc définir une première réserve située dans la zone fissurée de surface et descendant lentement à travers la zone de transfert.

L'importance de cette réserve est faible ; elle assure (peut-être) 1/10 du débit d'étiage.

B) L'engorgement des zones profondes pendant la crue constitue une deuxième réserve.

Cette réserve peut se décomposer en deux :
1. un stockage dans les conduits karstiques,
2. un stockage dans les fissures tectoniques (1).

Cette distinction doit être explicitée :

- les conduits karstiques sensu stricto constituent un réseau de drainage des eaux extérieures infiltrées. L'écoulement normal dans ce type de conduit se fait de haut en bas. L'engorgement se fait par remontée de l'eau avec généralement une surface libre.
- Il existe par ailleurs des fissures et microfissures tectoniques qui n'appartiennent pas au réseau karstique et ne participent pas au drainage des eaux de surface. Pendant les crues, il y a engorgement du réseau karstique et mise en charge. La pression provoque l'injection d'eau dans les fissures. Le phénomène est identique à celui qui s'observe lors d'un essai d'eau en sondage ou pendant la mise en charge d'une galerie artificielle non revêtue.

Ce mécanisme est un facteur de régulation des crues puisque, au stockage dû à l'engorgement, s'ajoute un stockage par injection dans la masse rocheuse.

Cette capacité de stockage de la zone injectée peut cependant évoluer avec le temps. 1) les mises en pression provoquent l'injection d'argile dans les fissures ; 2) il peut également y avoir karstification de certaines fissures avec l'agressivité des eaux.

On peut donc envisager les mécanismes suivants (fig. 28) :

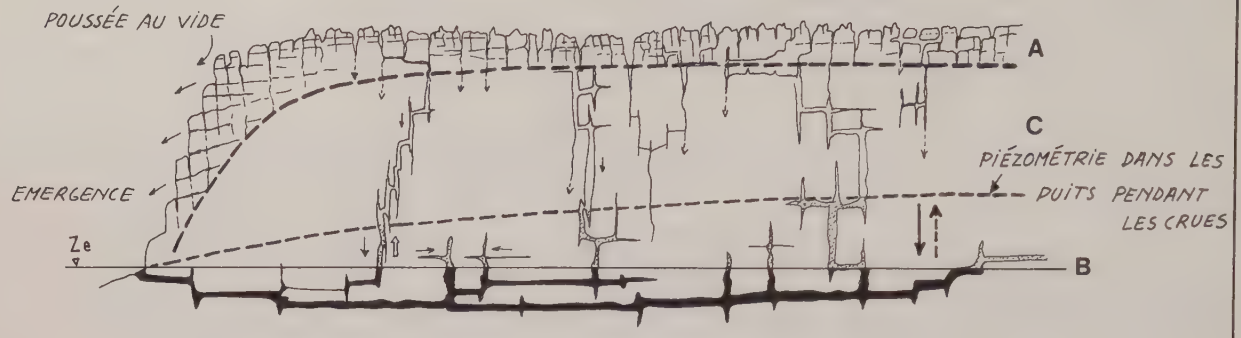
Les eaux qui assurent le débit en période sèche proviennent :

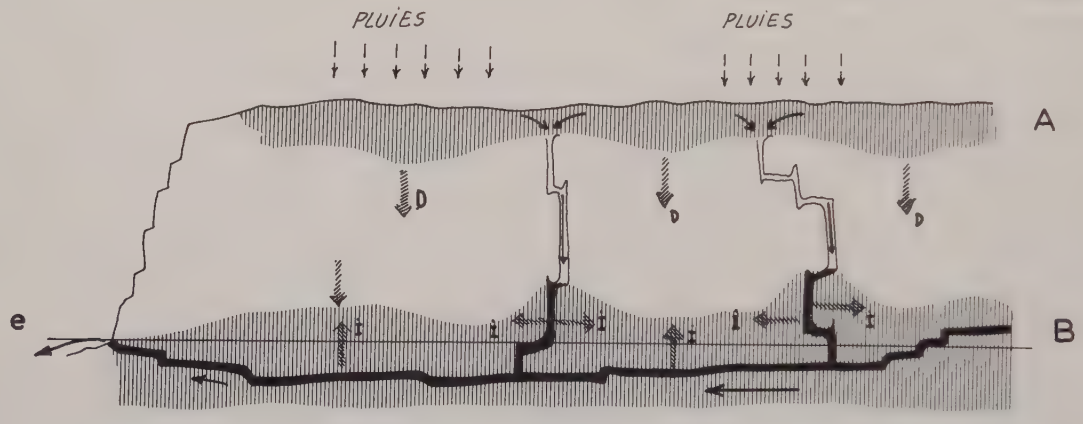
1) de la zone A : cette zone fissurée proche de la surface, piège l'eau des précipitations dans les fines fissures ou dans des fissures borgnes,
2) de la zone B : zone injectée par les mises en charge,
3) de la vidange des conduits karstiques de la zone profonde.

Si la roche est suffisamment fissurée, la surface piézométrique est une réalité ; en tous points, un sondage peut mettre en évidence l'existence du toit de la nappe. Cette nappe est alimentée par injection mais également par les apports provenant de la zone de transfert ; les variations peuvent être complexes selon la porosité de la roche, la nature de la fissuration et l'importance du réseau.

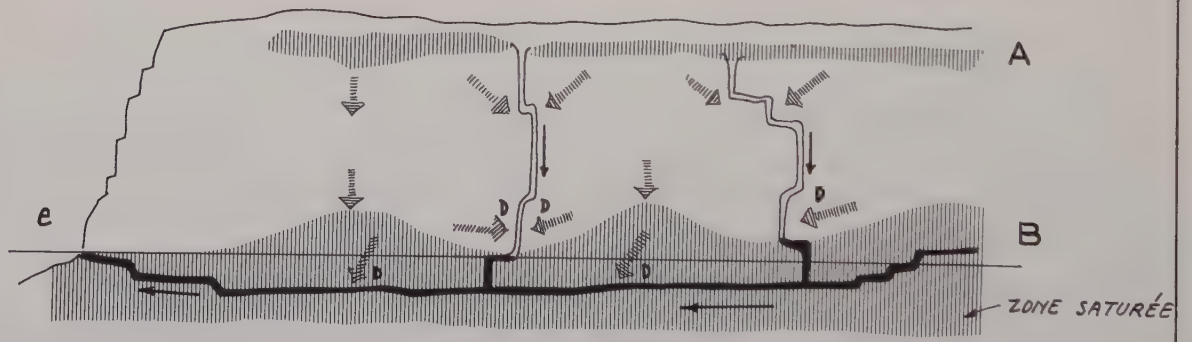
(1) *Dans certains cas assez rares (roches dolomitiques par exemple), la roche peut présenter une porosité matricielle. La roche se comportera alors en roche réservoir.*

FIG 28





RÉGIME DES ÉCOULEMENTS EN PÉRIODE DE CRUE



RÉGIME DES ÉCOULEMENTS EN PÉRIODE DE DÉCRUE

A ZONE DE STOCKAGE

C ZONE DE TRANSFERT

B ZONE DE STOCKAGE PAR INJECTION

→ ÉCOULEMENT EN CONDUIT

⇒ ÉCOULEMENT EN FISSURE

I INJECTION

D DRAINAGE

HYPOTHÈSES SUR LES RÉGIMES D'ÉCOULEMENT DANS UN MASSIF KARSTIQUE

En effet, si le réseau est un drain efficace (fissures franches, porosité matricielle faible), la vidange de la zone B commence dès que la mise en charge diminue, les apports par la zone de transfert étant inférieurs au drainage effectué par les conduits du réseau.

Si la porosité est forte, la fissuration fine, les apports diffus de la zone de transfert seront supérieurs aux capacités drainantes du réseau et la nappe continuera à monter après la fin de la mise en charge. Il y aura décalage entre le maximum de la crue à l'émergence et le maximum de la nappe ; c'est, semble-t-il, le cas dans certaines zones du bassin versant de la FONTAINE DE VAUCLUSE.

● En résumé :

Les aspects multiples de la modulation des apports par le réseau karstique montrent qu'il est indispensable, pour analyser le régime d'une source karstique, d'évaluer l'importance relative des différents facteurs du régime. On conçoit malheureusement immédiatement combien l'estimation quantitative des différents facteurs est difficile.

En principe, il faudrait connaître les courbes :

$$Qe = f(t) \qquad (1)$$
$$Qe = f(\Delta H) \qquad (2)$$
$$QA = f(t) \qquad (3)$$

ainsi que le régime et l'origine des apports pluviométriques (4).

(1) et (4) sont généralement connus ; il en est malheureusement pas de même pour (2) et (3).

● En pratique :

1. Si le régime des écoulements karstiques dans une région est caractérisé par des crues et des décrues brutales, on est vraisemblablement en présence d'un karst évolué assurant un transfert et une restitution brutale des apports.

2. Par contre, si le régime des écoulements karstiques présente une modulation importante des apports, le problème a plusieurs solutions :

a) alimentation du réseau partiellement assurée par des pertes ou des névés,
b) modulation au-dessus de la zone de transfert,
c) modulation par restitution lente de la réserve profonde,
d) modulation par l'étendue du bassin versant,
e) modulation par perte de charge importante à proximité de l'émergence (modèle du bouchon poreux) (pas d'exemple connu).

Il faut donc, pour préciser le phénomène, avoir dans ce cas des données supplémentaires :

- vitesses de transfert,
- piézométrie, perte de charge.

3.5. PERMEABILITE ORIENTEE DU MASSIF CALCAIRE

Le réseau karstique est capable d'absorber et d'évacuer (sauf en période exceptionnelle) tous les apports que reçoit le massif calcaire. C'est lui qui donne au massif cette perméabilité qui rend inutile un réseau d'écoulement de surface. Mais, de même qu'un réseau d'écoulement de surface est orienté, la perméabilité du massif calcaire est une perméabilité orientée.

Par conséquent, la notion de longueur de ligne de fuite ne peut pas, en pays karstique, être utilisée pour évaluer des débits, c'est-à-dire être associée à une perte de charge.

La perméabilité est très grande dans le sens vertical pour toute la partie du massif située au-dessus du niveau de base. Cette perméabilité verticale est générale ; en n'importe quel point du massif, l'enfouissement des eaux est possible.

Au-dessous du niveau de base, la perméabilité est ordonnée autour du réseau horizontal. Ce dernier est bien individualisé, orienté et finalement très isolé dans la masse du massif. Mais, avant d'emprunter ce réseau, les eaux doivent obligatoirement transiter par les conduits verticaux de la zone de transfert.

Si l'histoire karstologique du massif est complexe, des niveaux horizontaux "suspendus" correspondant à d'anciens niveaux noyés peuvent exister. Ces niveaux fossiles sont le plus souvent en partie colmatés.

°
° °

CHAPITRE

4

Morphologie des vides karstiques

PLAN

- Introduction

1 - Les cavités pénétrables

2 - Les cavités karstiques impénétrables

3 - Pourcentage de vides du massif calcaire

°
° °

RESUME

Les deux problèmes pratiques posés dans les études des retenues de barrages par les cavités karstiques, sont leur repérage et leur traitement. Par rapport à ces deux problèmes, il faut distinguer le karst de joints et le karst de fissures ; l'un et l'autre peuvent être pénétrables ou impénétrables.

Le karst de joints est localisé dans les joints de stratification ; de section elliptique, il est peu concrétionné, mal colmaté par des matériaux fins et difficile à repérer. Le karst de fissures correspond à l'élargissement de fissures généralement verticales ; concrétionné, souvent bien colmaté par des matériaux argilo-graveleux, il est plus facile à repérer et à traiter. Les grandes galeries et les grandes salles sont spectaculaires mais rares.

Les fissures peuvent appartenir ou non au système karstique de drainage; c'est une question mal connue.

Sauf à proximité des versants, l'ensemble des vides effectifs du massif calcaire est vraisemblablement voisin de 0,1 %.

°
° °

MORPHOLOGY OF THE KARSTIC CAVITIES

SUMMARY

The two practical problems with karst cavities in the investigation of dam reservoirs is finding and treating them. In this connection, a distinction must be made between"joint karsts"and"fracture karsts!Either might be big enough for a man to pass.

"Joint karsts"are confined to bedding joints. They are of elliptic section, with little concretion, incompletely plugged by fine material and difficult to locate!"Fracture karsts"represent a widening of usually vertical fractures. They have concretions, are often well plugged with clay and gravel and are more easily found and treated. Large galleries and chambers are spectacular but rare.

Fractures may or may not belong to a karst drainage system; there is very little information on this point.

The total percentage of effective voids in a limestone mass is probably close to 0.1 %, except near the surface slopes.

• INTRODUCTION

Les cavités karstiques ont fait l'objet de nombreuses études portant notamment sur leur forme, leur génèse et leur évolution. Chacun de ces points de vue permet d'établir un classement.

La classification adoptée dans ce texte est inhabituelle. Elle a été choisie car, en plus de sa simplicité, elle paraît la mieux adaptée aux problèmes posés par l'existence de vides karstiques dans les fondations des ouvrages de génie civil. Pour ces derniers, les problèmes à résoudre sont premièrement le repérage, ensuite le traitement des cavités. En général, le traitement devra être entrepris sans avoir la possibilité d'examiner "de visu" tous les vides décelés ou supposés.

En dehors des problèmes de repérage et de traitement, l'analyse morphologique des cavités est nécessaire au stade des études. Elle permet bien souvent de préciser le contexte hydrogéologique dans lequel se sont creusées les cavités. Par exemple, certains types de cavités n'ont pu se développer que dans la zone noyée. Si la nappe phréatique actuelle est située bien au-dessous, elles correspondent donc à une phase de karstification ancienne, indépendante de la morphologie actuelle.

D'une manière pragmatique, on peut distinguer deux catégories de cavités : les cavités pénétrables et les autres. Les premières sont évidemment les mieux connues.

1 - LES CAVITES PENETRABLES

La quasi-totalité des cavités rencontrées peut être rangée dans l'un des deux groupes suivants :

- groupe 1 : les "karsts de joints" ou d'interstrates (1),
- groupe 2 : les "karsts de fissures" (1).

1.1. LE "KARST DE JOINTS"

Les cavités de ce groupe se sont développées dans les joints qui séparent les bancs lithologiques. La cavité s'amorce en général à l'intersection d'un joint et d'une cassure le plus souvent sensiblement perpendiculaire à ce joint.

La forme élémentaire des cavités de ce type est illustrée par les photos 7, 8, 12, 15, 16, 17, 18. C'est un conduit de section arrondie, ou plus souvent

(1) *Le terme de "karst" employé dans le sens de cavité karstique est très discutable. Il est cependant utilisé d'une manière habituelle sur les chantiers de travaux publics. Il englobe pour le mineur et l'ingénieur tous les vides colmatés ou non qui ne sont pas des vides artificiels ou des vides dus à la décompression.*

elliptique. Cette forme élémentaire pourra par la suite être retouchée par des actions érosives diverses.

Ces conduits se développent dans le joint stratigraphique en suivant fréquemment un tracé en ligne brisée, orienté par la fracturation. La section moyenne est voisine du m2 ; elle peut rester constante sur de grandes longueurs. Dans les cavités de ce type, il est rare que des concrétions importantes occupent la voûte. Si la section des conduits est supérieure au m2, ces cavités constituent alors des galeries type photo 8, où la marche est aisée en raison de l'absence d'éboulements et de concrétions.

Ces cavités sont bien développées dans les séries horizontales stratifiées en bancs d'épaisseur moyenne, séparés par des joints francs.

1.2. LE "KARST DE FISSURES"

Ce type de cavités est dû à l'élargissement par l'érosion karstique des fissures voisines de la verticale : photos 9, 10, 11.

Ces cavités peuvent avoir une extension verticale importante qui atteint parfois plusieurs dizaines de mètres. Le concrétionnement y joue souvent un rôle primordial et peut avoir une ampleur considérable. Le développement horizontal de chaque cavité est rarement très grand. Sur une coupe horizontale, le réseau dessine un tracé en baïonnette. Ce type de karst est fréquent dans les massifs découpés par des réseaux de fissures verticales franches.

Cas particulier des puits : dans la zone de transfert, les grands puits peuvent être assimilés à des karsts de fissures ; très souvent d'ailleurs, ils présentent une section elliptique très aplatie. Ces puits paraissent n'avoir jamais fonctionné en régime noyé. Au contraire, dans la zone noyée (1) les plongées révèlent souvent des puits de taille plus modeste (quelques dizaines de mètres), de section presque circulaire et qui ressemblent, du point de vue morphologique, aux conduits de joints.

1.3. LOCALISATION DES "KARSTS DE JOINTS ET DE FISSURES"

Dans un réseau, il est habituel de rencontrer, juxtaposés, les deux types de cavités. Les karsts de joints se développent à différents niveaux et sont reliés entre eux par des karsts de fissures.

Si l'on tient compte de sa fréquence, on constate que, près de la surface, le karst de joints est relativement rare. Quand il existe, la section des conduits est variable et les conduits sont de faible longueur. Par contre, il se développe dans les zones profondes et dans les zones noyées où il constitue la plus grande partie des cavités ; dans ces zones, la section des conduits est relativement constante et peut atteindre plusieurs m2.

(1) *Il faut encore préciser qu'il s'agit de la zone noyée, sensu stricto, c'est-à-dire qui n'a jamais été dénoyée.*

Le karst de fissures, au contraire, est prépondérant près de la surface; le lapiaz est d'ailleurs en quelque sorte une forme ouverte de karst de fissures. Dans la zone de transfert, on peut considérer qu'il est représenté par les puits.

1.4. LES GALERIES "GIGANTESQUES" ET LES SALLES

On appelle galeries "gigantesques", les galeries qui ont une largeur et une hauteur comparables aux grandes salles (20 m x 20 m par exemple), mais qui ont également un développement longitudinal nécessitant qu'elles soient considérées comme des galeries (1).

La notion de salle en elle-même, est ambiguë ; dans les réseaux étroits, un élargissement bien localisé sera dénommé salle, tout en ayant des dimensions inférieures à celles des grandes galeries d'un autre réseau.

Les plus grandes cavités naturelles, telles que salle du Concert à POSTONYA (Yougoslavie), salle de la Verna (France), grotte Gigante (Italie), Orgnac (France), contiendraient facilement des édifices de la dimension des grandes cathédrales.

Pour citer quelques chiffres, notons que les dimensions de la grotte GIGANTE (Italie) sont les suivantes : longueur 240 m, largeur 132 m, hauteur 137 m ; quant à la CARLSBAD CAVE au Nouveau Mexique, elle atteint : longueur 1200 m, largeur 190 m, hauteur 105 m.

De telles cavités, qui illustrent l'ampleur du phénomène karstique, restent cependant exceptionnelles ; par contre, les réseaux karstiques donnent souvent accès à des cavités dont le volume atteint plusieurs dizaines et même plusieurs centaines de m3.

En gardant présent à l'esprit la finalité du classement choisi, les salles peuvent être classées en deux groupes :

- groupe 1 : salle creusée par dissolution et par érosion mécanique (abrasion par les eaux chargées) ;
- groupe 2 : salle creusée par dissolution, érosion mécanique et éboulement.

Le premier groupe contient des cavités résultant de l'action de l'érosion karstique sur un joint ou plus rarement sur des fissures. Si la lithologie est favorable (banc épais, peu fissuré), la cavité peut dépasser 10 m, exceptionnellement plus de 20 m de large, tout en restant relativement basse. L'absence de blocs sur le plancher caractérise ces cavités. Le plus souvent cependant, le sol rocheux n'est pas visible ; il est recouvert par des dépôts argileux de décantation.

(1) *Ce sont généralement des galeries creusées par corrosion, seul mécanisme pouvant assurer une section constante sur une grande longueur. Creusées en zone noyée, certaines ont été légèrement remaniées par les éboulements dans la phase terminale de leur évolution qui a correspondu à la mise hors d'eau (voir chapitre 5).*

Inversement, le deuxième groupe est caractérisé par des salles dont le plafond est le résultat d'éboulements successifs. Le plancher rocheux est alors invisible, recouvert sur des épaisseurs parfois considérables par des blocs éboulés (photo 13 et photo 14).

Par rapport aux critères génétiques, l'absence de frontière entre les deux groupes est évidente. Lorsque la dimension d'une cavité devient excessive par rapport à l'épaisseur des bancs et à la densité de la fracturation, les éboulements entrent en jeu et la cavité change de groupe.

Cette classification présente un grand intérêt pratique en génie civil. Les salles du premier groupe sont franches, même si elles sont en partie remblayées par de l'argile ; on peut aisément mettre à nu le rocher en radier et, par conséquent, y effectuer un blocage ; les cavités du deuxième groupe permettent rarement d'atteindre en radier le plancher rocheux ; le blocage par injection y sera toujours suspect ; le risque de contournement par renard dans le matériau éboulé ne peut être écarté.

1.5. LIMITES DES CAVITES EXPLORABLES

Au-dessous de dimensions voisines de 50 cm x 25 cm pour les conduits horizontaux ou 23 cm de large pour les fissures, l'exploration spéléologique devient impossible.

Ces limites sont évidemment indépendantes du phénomène karstique et dépendent uniquement de la morphologie humaine.

Cette observation conduit à deux remarques :

- la connaissance directe des réseaux se limite aux parties du réseau dont les dimensions sont continuellement supérieures aux dimensions minimales. Des diaphragmes impénétrables peuvent rendre inaccessibles d'importantes parties du réseau situées au-delà ;
- si les diaphragmes qui arrêtent la progression sont rocheux, ils constituent une section de contrôle dont la taille permet d'étudier les phénomènes hydrodynamiques (voir chapitre 3 : les vitesses ; chapitre 5 : l'érosion mécanique).

2 - LES CAVITES KARSTIQUES IMPENETRABLES

Les travaux de génie civil au rocher permettent d'observer des vides karstiques impénétrables qui peuvent être rangés sans ambiguité dans l'un ou l'autre des deux groupes précédemment définis. Ces cavités ont les mêmes caractéristiques morphologiques que leurs homologues pénétrables. Il existe cependant un phénomène d'échelle : par exemple, les karsts de joints de petite taille ont généralement une section variable et un tracé capricieux ; d'autre part, dans ces petites cavités, le concrétionnement joue un rôle important : la moindre coulée

de calcite peut modifier profondément les conditions d'écoulement et influencer ainsi l'évolution ultérieure (1). Par contre, les éboulements y jouent un rôle négligeable.

- LES FISSURES

Comme toutes les roches, les roches calcaires sont fissurées en l'absence même de tout phénomène de karstification. Toute discontinuité ou vide peut se classer dans le tableau suivant :

		A - fissures de décompression	B - diaclases et microfissures	C - faille
discontinuités non karstifiées				
discontinuités karstifiées	I fissures drainantes			
	II fissures de stockage de l'eau par injection			

Les discontinuités de type A, B, C, existent pour toutes les roches. Dans un massif calcaire, elles peuvent dans certains cas ne pas être karstifiées.

Rappel : Les fissures (type I) assurent l'alimentation du réseau profond ; elles s'intercalent entre la surface et la zone profonde ; elles drainent les zones supérieures en assurant l'écoulement vers les zones noyées.

Les fissures (type II), au contraire, ne drainent pas le massif, mais sont susceptibles d'être injectées par le réseau profond quand la charge piézométrique augmente. Dans ce cas, si les eaux ne sont pas chargées d'argile et sont suffisamment agressives, il peut y avoir à la longue, karstification. Dans bien des cas cependant, il y a, semble-t-il, colmatage par l'argile.

Dans la pratique, classer une fissure dans l'un ou l'autre groupe est difficile. Si l'on peut, par l'observation directe ou sur échantillon, mettre en évidence l'élargissement par dissolution (mécanisme spécifique de la karstification), on doit admettre que cette fissure participe soit au drainage du massif, soit au stockage de l'eau en période de crue.

(1) *Ces cavités obéissent souvent à une loi du "tout au rien". Ou bien il y a concrétionnement total, ou bien elles restent vides.*

Dans le cas contraire, il est peu probable que cette fissure participe au drainage ; par contre, elle peut participer ou non au stockage. La présence d'argile (injectée le cas échéant) ne prouve absolument pas qu'une fissure appartient au système drainant du massif.

En fait, il s'agit là d'un problème actuellement très mal connu. Il faudrait mieux connaître (voir chapitre 3) la capacité d'emmagasinement et de restitution de ces fissures pour pouvoir juger quel pourcentage de fissures participe réellement au drainage et au stockage dans le massif calcaire.

3 - POURCENTAGE DE VIDES DU MASSIF CALCAIRE

L'ensemble des discontinuités karstifiées ou non représente un certain pourcentage de vides qui a donné lieu à de nombreuses évaluations.

- Valeurs moyennes : dans les premiers mètres, sous la surface, le pourcentage de vides peut varier de 50 à 10 % ; c'est le lapiaz.

Au-dessous de 5 à 10 m (quelques dizaines de mètres exceptionnellement), le pourcentage tombe à des valeurs inférieures à 5 % ; il varie alors entre 0,1 et 5 %.

L'évaluation de ces pourcentages a été faite selon plusieurs méthodes :

a) Mesure directe : lever géologique en galerie et mesure de l'épaisseur des fissures.

b) Mesure indirecte par évaluation des volumes de coulis injecté à partir de sondages : cette méthode donne une précision faible car il est toujours difficile de connaître le rayon d'action d'un forage. Avec ce procédé, il n'est pas possible de distinguer les fissures karstiques des autres.

c) Etude des variations des niveaux des nappes de fissures en fonction des apports et des débits.

d) Observation des volumes restitués par le massif calcaire après vidange complète d'une retenue. Les mesures de ce type sont rares car elles impliquent que la taille de la retenue soit faible (ce qui permet une vidange rapide), que le point de résurgence soit connu et que les débits y soient facilement mesurables. La difficulté est, dans ce cas, d'apprécier le volume exact du massif qui a été essoré.

Remarque : Dans les mesures directes (en galerie notamment), la largeur totale des fissures karstifiées est comptée, que ces fissures soient ou non colmatées.

Dans les mesures indirectes (volume injecté, variation de nappe), seuls les vides réellement disponibles sont décelés. Il est donc délicat de comparer les résultats de ces différentes méthodes.

● Résultats :

1) La réalisation des voiles d'injection en pays calcaire karstique montre que, si on excepte le traitement des quelques grandes cavités rencontrées sur le site, la quantité de coulis injecté n'est pas supérieure à celle injectée dans des terrains non calcaires dont la fissuration (densité, style) serait identique.

2) Les mesures des débits restitués (méthode, exemple cuvette de CHARMINE-MOUX) donnent des pourcentages de vides réels (disponibles pour stocker l'eau) voisins de 0,1 %.

3) Les mesures directes effectuées en galerie dans des zones situées à moins de 100 m du versant et dans des calcaires horizontaux stratifiés ou massifs, donnent un pourcentage de "vides" égal à 2,5 %.

   Les 2,5 % de "vides" se décomposent comme suit :
   - 90 % représentent des poches karstiques de grande taille (généralement colmatées, sauf à proximité de la surface),
   - 10 % représentent des diaclases.

On constate donc que les pourcentages élevés sont, dans tous les cas, dus à la présence de cavités karstiques de grande taille.

● Commentaires :

La karstification n'est pas homogène dans toutes les directions, et les réseaux sont toujours localisés dans quelques horizons préférentiels ; la densité des indices, obtenue (voir chapitre 1) pour les zones très karstifiées, est voisine d'une grotte au km2.

Si cette grotte est dans une unité de 200 m de puissance, il faudrait qu'elle ait 2000 km de développement en conduits de 1 m2 de section pour obtenir une karstification généralisée de 1 % ! Or, en général, son développement se limite à quelques centaines de mètres de galeries pénétrables. Par conséquent, quelle que soit l'importance des cavités ignorées ou impénétrables, il ne paraît pas fondé de prendre une valeur supérieure à 0,1 % (valeur obtenue par mesure des débits restitués), pour évaluer les vides existants dans un massif, sous une couverture de quelques dizaines de mètres.

Par contre, près de la surface ou localement (dans un appui de barrage), le pourcentage de vides peut atteindre 1 % et plus.

°
° °

CHAPITRE

5

Genèse et évolution du karst

PLAN

- Introduction
- Originalité du karst

1 - Les mécanismes

2 - La dissolution

3 - L'érosion mécanique par les eaux courantes

4 - Le concrétionnement

5 - Les éboulements

6 - Les colmatages et les décolmatages

7 - Commentaires - Conclusions

°
° °

RESUME

Contrairement aux autres formes d'érosion, la karstification peut laisser dans un massif calcaire des réseaux fossiles représentant des phases de karstification antérieures ; ces réseaux fossiles peuvent influencer la karstification en cours et sont une des causes de la complexité du karst.

La dissolution est le mécanisme spécifique de la karstification. La vitesse de cette érosion peut, dans certains contextes climatiques, être visible à l'échelle de la vie humaine ; le concrétionnement, mécanisme complémentaire de la dissolution, peut être encore plus rapide. L'érosion mécanique joue un rôle, mais c'est un rôle secondaire, localisé dans le temps (périodes de crues) et dans l'espace (zones d'étroiture).

Moins connu, le rôle des éboulements est important.

Les phénomènes de colmatage et de décolmatage des réseaux sont en liaison avec le concrétionnement et également avec la dissolution qui est une des sources des matériaux insolubles. Dans ce domaine, il faut distinguer l'autocolmatage du karst à partir de ses propres produits insolubles et le colmatage (assez fréquent) par des apports extérieurs, moraines et argile glaciaire par exemple.

Il faut attirer l'attention sur le rôle des variations de pression, conséquence des mises en charge du réseau. Ce facteur semble jouer un rôle très important dans la localisation des zones de corrosion et la vitesse de cette dernière. Il explique l'absence (surprenante) dans certains cas, de tout indice de surface au-dessus de cavités importantes.

°
° °

KARST GENESIS DEVELOPMENT

SUMMARY

Unlike other forms of erosion, karstification can leave fossil systems in limestone representing earlier phases of karstification. These may affect subsequent karstification and are one of the reasons why karsts are so complex.

Dissolution is the specific mechanism of karstification. The rate of this erosion can, in some climatic contexts, be visible over the human life span. The concretionary process, which is complementary with dissolution, can be even more rapid. Mechanical erosion is also a factor, but only on a secondary scale and is limited in time (floods) and space (bottlenecks).

The effect of falls, although less well known, is important.

The sealing and re-opening of systems are linked with the concretionary and dissolution processes, the latter being one of the sources of insoluble material. In this respect, a distinction must be made between self-sealing due to insoluble substances produced by the karst itself and sealing by outside materials (which is fairly frequent), e.g. moraine and glacial till.

It is important to mention the pressure variations due to the pressure rise in the system. This factor seems to play an important part in determining the position of the zones of erosion and the erosion rate. It explains the (surprising) absence in some cases of any surface indicators above major cavities.

● INTRODUCTION

Le réseau karstique est le résultat d'une évolution qui se poursuit plus ou moins de nos jours, sauf peut-être dans certaines régions désertiques ou glacées. Par rapport à la durée des ouvrages de génie civil, le réseau karstique peut paraître immuable.

La connaissance des mécanismes qui modèlent le karst est cependant indispensable car elle seule permet de comprendre la signification des indices, la complexité de certains réseaux et les phénomènes observés lors de la mise en eau des retenues artificielles.

● ORIGINALITE DU KARST

La karstification présente un caractère original par rapport aux autres mécanismes morphogénétiques. Le karst se développe en effet à l'intérieur d'un volume tri-dimensionnel ; en évoluant, il abandonne ses anciens conduits qui sont pour la plupart conservés. Alors qu'en creusant sa vallée, un écoulement de surface fait disparaître en quasi-totalité les phorphologie antérieures, le réseau karstique peut être constitué par la superposition de plusieurs réseaux plus ou moins indépendants, témoins de différentes périodes de karstification (1).

(1) *En surface, on trouve, dans certaines conditions, des traces d'anciennes morphologies (ancien lit, paléosurface, etc.), mais la fréquence, l'importance et le rôle que jouent ces paléomorphologies ne sont pas comparables au rôle joué par les paléokarsts.*

1 - LES MECANISMES

Si la dissolution est le caractère spécifique de la karstification et confère son originalité au milieu karstique, d'autres mécanismes participent également à la création du karst : concrétionnement, mise en place de dépôts, transport, éboulement.

Le tableau (fig. 29) schématise l'importance des différents facteurs, en fonction des diverses zones du réseau karstique.

2 - LA DISSOLUTION

- Importance du phénomène

Pour les sources les plus importantes de PROVENCE (France), l'analyse chimique de l'eau fournit les résultats suivants :

	CaCO3	MgCO3	Total
	en mlg par litre		
FONTAINE DE VAUCLUSE	158,6	?	
FONTAINE L'EVEQUE	173	49	222
Source d'ARGENS	230	64	294
Source de la CASSOLE	158	107	265
Source de SAINT ROSAIRE	202	110	315
Source de la FOUX	158	92	250
Source du GAPEAU	133	104	237

En moyenne, les eaux karstiques contiennent donc 0,25 g/l de carbonate; en général, les teneurs diminuent en période de crues.

Un rapide calcul montre que la source de FONTAINE L'EVEQUE par exemple, avec un débit moyen de 6 m3/s, "fournit" par an 36.000 T de carbonate soit 14.000 m3 de calcite, et FONTAINE DE VAUCLUSE 59.000 m3.

Les observations de surface permettent, dans certains cas, d'évaluer la vitesse de la dissolution.

Exemples :

Depuis la dernière glaciation, la surface glaciaire de certains lapiaz de haute montagne s'est abaissée de 15 cm, les buttes témoins de l'ancienne surface, protégées de l'érosion par des blocs erratiques laissés par les glaciers, servant de points de repère.

On peut constater également (éboulement DES FIZ, altitude 1800 m, Haute Savoie, France) que des blocs éboulés en 1750 présentent sur les faces de rupture des cannelures de dissolution de 2 à 4 cm de profondeur qui sont le résultat de 200 ans d'érosion.

FIG 29

	érosion mécanique par l'eau (abrasive)	dissolution	concrétionnement	éboulement	dépôts	
					fins	grossiers
lapiaz	très faible	très importante	nul	nul (1)	généralement faibles (2)	nuls
zone de transfert	forte mais locale pendant les crues	variable	important	moyen	réduits	assez importants
zone noyée-dénoyée	variable ; dépend du débit (3)	variable souvent importante	moyen (4)	important	importants	importants
zone noyée	très localisée	importante et prédominante	nul	très faible	importants	très réduits

(1) La végétation, la neige peuvent provoquer un entraînement de blocs.
(2) Apports éoliens éventuels et entraînement de terre.
(3) Ce mécanisme est à l'origine des surcreusements en radier dans les galeries creusées par dissolution en zone noyée puis dénoyée.
(4) Il faudrait tenir compte du rythme des variations du niveau piézométrique. Dans les zones noyées régulièrement (crue annuelle ou saisonnière), le concrétionnement est faible. Par contre, dans les zones noyées lors des crues exceptionnelles (par exemple crues décennales), les concrétions ont le temps d'apparaître et de se consolider.

Fig. 29 : Importance des différents mécanismes d'érosion dans les diverses zones du réseau karstique.

Par contre, sur des blocs éboulés en 1450 (éboulement du CLAP-DE-LUC, altitude 600 m), ce même phénomène ne s'observe pas.

Ces exemples font apparaître que l'évolution karstique de surface peut être presque visible à l'échelle humaine, mais ils montrent également que de nombreux facteurs (altitude, climat) ont une influence sur la vitesse d'évolution du phénomène.

Ces quelques chiffres montrent la réalité et l'importance du phénomène de dissolution. Il faut cependant éviter de raisonner en faisant des régles de trois hasardeuses sur des périodes longues, pour reconstituer des paysages antérieurs.

- Localisation des zones de dissolution

La dissolution ne s'effectue pas uniformément dans toute la masse calcaire. En surface, la dissolution est pratiquement le seul facteur qui modèle le lapiaz. Toutes les études concordent sur ce point.

Dans les zones noyées où la vitesse de l'eau est faible (quelques mètres par heure), la dissolution est également le seul mécanisme d'érosion possible.

Le phénomène de corrosion est complexe car l'agressivité des eaux dépend de plusieurs facteurs : température, pression, possibilité de régénération. Dans certains cas, il semble qu'il faille envisager la possibilité, pour une eau infiltrée, de plusieurs cycles : corrosion, saturation, dépôt. Par exemple, dans les parties profondes du réseau, le mélange d'eaux d'origine différente peut être un facteur de corrosion (Boëgli 1964).

3 - L'EROSION MECANIQUE PAR LES EAUX COURANTES

Elle est indiscutable dans toutes les zones en écoulement libre où l'on retrouve les morphologies classiques des écoulements de surface en terrain non calcaire : marmite de géant, surcreusement, canyon, méandre, etc. A la base des grands puits, le phénomène peut être spectaculaire.

Dans les zones noyées, le problème est différent.

D'une manière générale, les eaux karstiques ne sont pas chargées. Le transport solide est nul à l'émergence. On ne peut observer un trouble des eaux à la source que lors des crues exceptionnelles. Les teneurs en matières solides sont de toute façon très faibles et les matériaux présents n'ont aucune capacité abrasive.

Hormis ces limons très fins qui normalement se déposent par décantation, le réseau karstique dans les calcaires ne fabrique pas de matériaux du type sable. Les éléments qui tapissent certaines zones du réseau sont de grande taille (plusieurs cm) (1).

L'absence de matériaux abrasifs à l'émergence s'explique encore plus aisément pour les réseaux remontants dans lesquels les vitesses sont rarement capables de provoquer la remontée de particules solides. Le réseau fonctionne en dégraveur. Les matériaux transportables s'accumulent en quelques points particuliers et seule la dissolution empêche le colmatage du réseau.

Par contre, dans le cas des réseaux creusés dans les formations dolomitiques, les conduits peuvent être véritablement obstrués par les dépôts de sables dolomitiques peu solubles, accumulés dans les points bas ou dans les zones où la vitesse de circulation de l'eau est faible.

Pour qu'il y ait érosion, il faut que l'eau soit capable de transporter des particules solides. Pour les sables par exemple, les études sur les bassins de dessablement montrent que pour des vitesses inférieures à 0,3 m/s, il y a dépôt complet.

Si on examine d'autre part le diagramme (fig. 30), on constate que pour les vitesses moyennes mesurées dans ces réseaux, la taille des particules théoriquement transportables est extrêmement faible.

L'érosion mécanique ne peut donc être efficace que pour des vitesses supérieures aux vitesses moyennes, c'est-à-dire pour les vitesses atteintes seulement en périodes de crues.

L'érosion mécanique du réseau karstique paraît donc localisée dans le temps (périodes de crues) et dans l'espace (diaphragmes, étroitures) ; il est nécessaire, de plus, que l'eau soit chargée en particules solides.

(1) *A la source de FONTAINE L'EVEQUE, les eaux, célèbres par leur limpidité, se troublent légèrement en période de crue importante (crue annuelle). On peut avancer l'hypothèse que le trouble est dû aux eaux des rivières (VERDON, ARTUBY), qui participent à l'alimentation du réseau et qui sont fortement chargées en période de crue ; la faiblesse des teneurs n'a malheureusement pas permis de confirmer complètement cette hypothèse.*

Bien qu'étant des exceptions, quelques sources présentent un trouble permanent. Les sources de l'AAR, alimentées en grande partie par les eaux du DANUBE (fig. 10), présentent un trouble variable mais permanent qui limite la visibilité des plongeurs.

Au MEXIQUE (province du CHIAPAS), l'auteur a pu observer, en période de sécheresse, une importante source karstique (sortant d'un massif dolomitique) présentant un trouble important.

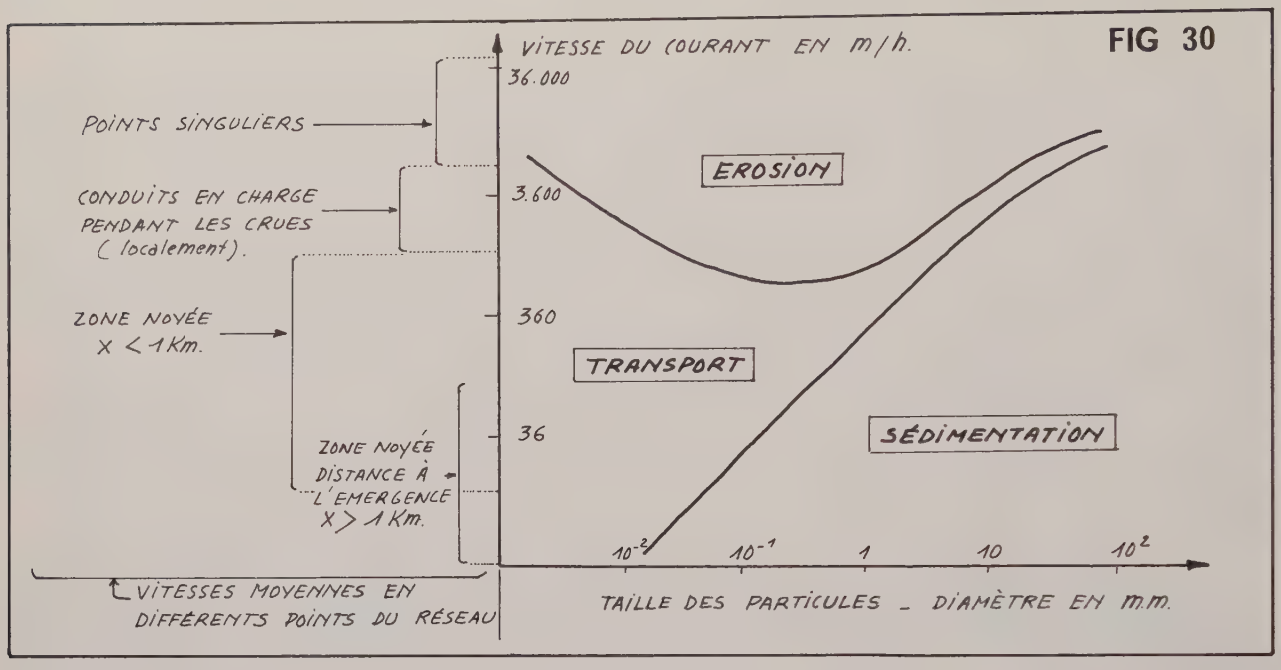


Fig. 30 : Possibilités de reprise des dépôts, de transport et de sédimentation en fonction de la vitesse moyenne du courant.
D'après HJULSTROM.

4 - LE CONCRETIONNEMENT

Il est exceptionnel dans la zone des lapiaz. Il est impossible dans les zones noyées (1). La présence de concrétions en place (stalactites, stalagmites), dans la zone noyée, prouve formellement que cette zone a été hors d'eau à une époque antérieure.

D'une manière générale, le concrétionnement est plus important quand l'épaisseur de la couverture est faible et la couverture végétale dense.

Les raisons en sont les suivantes :

- les eaux qui s'infiltrent dans le lapiaz se saturent en carbonate très rapidement (en quelques mètres) ;

(1) *Il faut cependant distinguer les concrétions-types (stalactites, stalagmites, draperies, coulées, etc.) des cristallisations. Dans certaines conditions, lorsque les eaux sont sursaturées, des cristaux se développent sur les parois, dans la zone noyée. Il est possible, en particulier, d'y trouver des scalénoèdres de calcite atteignant plus de 20 cm de longueur.*

- la karstification progresse de haut en bas en raison de l'abaissement du niveau de base qui suit l'enfoncement des rivières de surface. Les cavités les plus élevées sont en général les plus anciennes : le concrétionnement s'y est donc exercé depuis plus longtemps ;
- ces cavités élevées étant généralement plus sèches, la saturation de l'air n'y est pas totale ; aussi, l'évaporation y favorise-t-elle l'augmentation de la teneur en carbonates et le concrétionnement.

● Importance du concrétionnement suivant le type de karst

Dans les karsts de fissures, le concrétionnement est souvent important (draperie, enduit, etc.) ; il joue un rôle important dans l'évolution de ce type de cavité (voir 6 : colmatages et décolmatages).

Dans les grandes salles formées par éboulements, les concrétions seront souvent nombreuses et très développées, en particulier au toit.

Dans les conduits de joints, le concrétionnement en calotte est le plus souvent négligeable. Les concrétions y apparaissent le plus souvent sous forme de planchers de calcite (photo 16).

● Vitesse de concrétionnement

Elle dépend de nombreux facteurs et en particulier du climat.

On peut signaler par exemple que de fines concrétions ont pu atteindre 1 m de long en 25 ans,(Bauer E.W. (1971)); à FONTAINE L'EVEQUE, en 3 ans, se sont développées des stalactites de 15 cm de long.

Les formes de certains piliers stalagmitiques suggèrent par ailleurs un concrétionnement rythmique.

5 - LES EBOULEMENTS

Le rôle des éboulements est évident dans la morphogénèse du karst (photos 13 et 14).

Le mécanisme se manifeste chaque fois que la taille de la cavité devient incompatible avec la structure de la voûte. Ce mécanisme a été décrit par de nombreux auteurs. Il faut cependant signaler certains aspects particuliers de ce phénomène :

1) Les cavités qui se creusent par dissolution dans la zone noyée sont modelées dans un massif ayant un poids spécifique apparent de 1,6 kg/dm3 environ. Lorsque l'abaissement du niveau piézométrique met hors d'eau ces cavités, le poids spécifique apparent du rocher formant la voûte passe de 1,6 à 2,6 kg/dm3. Dans certaines zones, la stabilité n'est plus assurée et il y a éboulement.

2) Dans les zones "noyées-dénoyées", des volumes saturés peuvent persister au toit d'une galerie après dénoyage rapide de celle-ci si le drainage naturel est médiocre. Dans ces conditions, la voûte supporte des efforts supplémentaires dus à la pression hydrostatique. Il peut y avoir rupture.

Le phénomène a pu être observé dans des galeries artificielles : une galerie de 7 m de diamètre, dans des calcaires karstiques horizontaux, était creusée depuis plusieurs mois. Le plan d'eau qui était au niveau H fut abaissé en quelques heures jusqu'au niveau H1. Pendant plusieurs heures, la chute de blocs situés aux naissances des voûtes interdit l'accès de la galerie. Le phénomène se produisit systématiquement sur toute la longueur de la galerie.

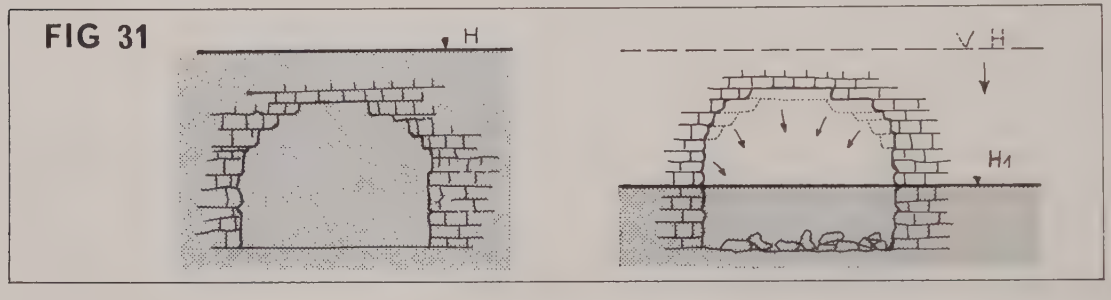


Fig. 31 : Effet sur la voûte, du dénoyage rapide d'une galerie artificielle.

Ce phénomène n'est pas lié à la nature calcaire du massif ; il s'observe également dans les roches cristallines. Il a fréquemment été observé dans les galeries d'amenée d'aménagements hydroélectriques. C'est au moment du dénoyage de la calotte que se produisent les chutes de blocs. On remarque en effet que, quelle que soit la taille des blocs éboulés, ces derniers sont toujours entraînés sur des distances très faibles (à quelques mètres du point de rupture).

Ces exemples montrent les efforts auxquels est soumis le rocher dans les zones "noyées-dénoyées".

Remarque : Malgré leur caractère spectaculaire, les tremblements de terre paraissent jouer un rôle extrêmement faible, même dans les grandes cavités.

6 - LES COLMATAGES ET DECOLMATAGES

C'est un mécanisme extrêmement important et qui est une des causes principales de la complexité du karst.

En fait, il est nécessaire de distinguer les remplissages situés à l'entrée ou près de l'entrée des grottes et les remplissages des zones profondes. Les premiers sont complexes : des mécanismes très divers entrent en jeu : cryoclastie, apports organiques, apports humains, etc. Mais ces remplissages n'influencent pas les circulations et le drainage du massif. Ils ne seront donc pas évoqués ; on rappellera cependant que ces dépôts peuvent masquer les entrées des cavités.

Il ne sera donc question ici que du colmatage des zones profondes.

- Nature des matériaux participant au colmatage

Les photos 13, 14, 15, 16 et 17 montrent les différents types de matériaux rencontrés :

- les argiles (photo 15),
- les galets, calcaires ou non (1), plus ou moins anguleux (photo 17),
- les dépôts concrétionnés soit en place, soit brisés et transportés (photos 16, 18),
- les matériaux fins : sable calcaire ou dolomitique et graviers,
- les blocs provenant des éboulements (photo 13).

- Origine des matériaux

Le massif calcaire karstifié fournit une partie des matériaux de colmatage. C'est la fraction insoluble qui peut représenter jusqu'à 25 % de la matrice rocheuse. Ces matériaux fournissent ce qui est communément appelé "argiles de décalcification".

Dans le Jurassique supérieur de PROVENCE, par exemple, les bancs calcaires sont séparés par de minces passées de marnes vertes contenant une forte proportion d'illite. Ce minéral argileux se retrouve dans les dépôts profonds.

Dans ces mêmes réseaux, les analyses montrent en outre la présence de montmorillonite, minéral attribué aux marnes éocènes et miocènes qui recouvrent ou recouvraient les formations calcaires. Les micas (originaires des marnes éocènes) qui se retrouvent dans certains dépôts, confirment d'ailleurs l'origine extérieure de ces matériaux, (Gaviglio (1972)).

Cet exemple illustre les deux origines possibles des matériaux argileux. Si on tient compte également du mécanisme de mise en place, il faut distinguer 3 cas :

a) le karst est peu à peu remblayé par la fraction insoluble des masses dissoutes : c'est <u>l'auto-colmatage</u> ;

(1) *Des galets provenant de formations non calcaires et entraînés dans le karst peuvent participer au colmatage ; c'est néanmoins exceptionnel, sauf notamment dans les régions où les moraines apportées par les glaciations quaternaires ont souvent recouvert les massifs calcaires de sable et de galets allochtones (ex : Jura, Pyrénées, France).*

b) le karst est remblayé des matériaux entraînés par les eaux de ruissellement et déposés dans le réseau. Dans ce cas, le mécanisme du colmatage est identique à celui du cas précédent, mais la quantité de matériaux peut être rapidement importante.

c) le karst est recouvert par une nouvelle formation qui va s'injecter dans le lapiaz. Dans ce cas, près de la surface, il y a non seulement entraînement, mais également injection. La zone d'influence de ce mécanisme d'injection est très variable selon la morphologie du karst, la nature et la fluidité du matériau.

● Nature du remblayage suivant le type de karst

Dans les nombreux cas d'auto-colmatage, la nature des remplissages dépend du type morphologique du karst.

Dans les karsts de fissures, les remblayages sont souvent un mélange de blocs éboulés et de débris de concrétions provenant des parois. Ces matériaux sont enchâssés dans de l'argile. Ce type de remblayage, caractérisé par la présence d'un "squelette", se compacte par gravité. Très dense ($d \neq 2$ pour les argiles), robuste, il peut former des bouchons efficaces qui résistent bien aux coups de pression en périodes de crues.

Dans les karsts de joints, le colmatage est le plus souvent argileux. Les seuls éléments indurés susceptibles de jouer le rôle de squelette sont des planchers de calcite, brisés ou non. La présence d'éléments grossiers indique généralement la proximité d'une salle à l'amont immédiat de la zone de dépôt.

● Le mécanisme de mise en place est le suivant :

1) chaque crue abandonne des limons argileux et apporte dans certains cas des éléments grossiers ;

2) par évaporation, dans les flaques dénommées "laisses", abandonnées par les crues au hasard de la morphologie, se déposent des pellicules de calcite qui évoluent lentement pour constituer un plancher ;

3) ultérieurement, un changement de régime, remettant en fonctionnement le conduit, peut déblayer l'argile en laissant, au moins partiellement, en place les planchers intermédiaires. Si la taille du conduit a provoqué des éboulements de la voûte, des blocs énormes peuvent être intercalés dans les matériaux fins.

Dans les karsts de joints, le remplissage n'est jamais total dans les zones profondes. Il reste toujours en calotte un passage possible pour l'eau.

● Alternance des phénomènes de colmatage-décolmatage

L'examen des réseaux montre que ceux-ci passent par des phases de colmatage et de décolmatage.

Exemple photo 20 : cette photo illustre un caractère commun à toutes les grottes des gorges du VERDON. Sur la paroi, on peut observer les restes d'un plancher concrétionné. Le remblayage sur lequel ce plancher s'est déposé a disparu. Au-dessus du plancher, la partie de la voûte non colmatée est souvent couverte par des cristaux de calcite.

7 - COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS

1) En l'absence d'un dépôt géologique venant recouvrir le massif calcaire et injecter le karst, le remblayage des grottes est en grande partie un remblayage hydraulique. Sauf en des points singuliers du réseau, le remblayage hydraulique ne peut, par définition, être total.Le premier bouchon ponctuel qui bloque l'écoulement arrête le mécanisme de mise en place; il reste, si petit soit-il, un vide en calotte (1).

2) Seules les concrétions qui se forment à partir des fissures de la voûte durant les périodes qui séparent les phases d'apport solide, peuvent réaliser un blocage total en quelques points singuliers.

3) La mise en place des matériaux de colmatage, apport solide ou concrétion, se fait en milieu aqueux ou en atmosphère généralement saturée. Le réseau fossilisé voit ensuite diminuer la teneur en eau de l'air intérieur ; il y a alors fissuration et tassement des remplissages argileux par perte d'eau.

Il en résulte que les remblayages de galeries horizontales sont, par la nature même des mécanismes qui les édifient, toujours incomplets. Les seuls remblayages pouvant véritablement colmater un conduit sont les remblayages tassés par gravité. Exemples : puits, karsts de fissures.

- Conclusions

L'examen des différents mécanismes qui contribuent à façonner le karst, conduit à la conclusion suivante : c'est en zone noyée que se creusent les grands réseaux. Cette zone bénéficie en effet d'un nombre important de facteurs favorables :

1) absence de concrétionnement ;

2) pression hydrostatique qui soulage les voûtes et limite les éboulements ;

3) possibilité pour l'eau de creuser des grandes cavités avec un débit faible ; c'est là un des caractères originaux de l'érosion karstique : l'érosion chimique peut en zone noyée corroder de vastes cavités sans débit important ; c'est une question de temps ;

(1) *Le fait que, en spéléologie, la progression des explorations butte sur des "étroitures", des "chatières", des "laminoirs" pour retrouver au-delà des espaces souvent vastes, n'est pas l'effet du hasard mais la conséquence du mécanisme de mise en place des remblayages.*

4) enfin, dans cette zone, les variations de pression dues aux mises en charge sont un facteur puissant d'érosion chimique et mécanique (1).

Cette conclusion paraît sous-évaluer l'importance du mécanisme éboulement-dissolution qui est à l'origine de toutes les salles gigantesques et d'un grand nombre de grandes rivières souterraines. Néanmoins, ces grandes cavités sont exceptionnelles et c'est normal. Ce mécanisme ne peut en effet s'amorcer que pour une cavité de dimension déjà importante. Il n'agit d'une façon grandiose qu'en quelques points singuliers ou sur quelques tronçons. Il correspond de plus à un équilibre instable entre une relative fragilité des voûtes et une capacité de déblayage par les eaux. Il reste toujours à la merci d'un foudroyage généralisé ou d'un colmatage par l'argile et les concrétions.

Cette conclusion attire également l'attention sur l'importance plus grande qu'il faut attacher au karst de joints par rapport au karst de fissures. En effet, dans la zone noyée-dénoyée, il apparaît clairement que chaque fois qu'un joint sub-horizontal propre à la karstification est situé dans la zone où la karstification est active, il est karstifié sur toute sa surface.

°
° °

(1) *Le dispositif mis en place à FONTAINE L'EVEQUE pour étudier le régime de la source permet actuellement d'envisager un certain nombre d'expériences mettant en évidence la corrosion chimique en calotte. Un programme d'essais est actuellement à l'étude. En dehors de son intérêt scientifique pur, la vérification de l'hypothèse servant de base aux essais envisagés, permettrait d'expliquer le développement des chapelles remontantes. Démontrer la réalité de ce mécanisme aurait deux résultats pratiques :*

a) en associant une morphologie typique à un processus précis, il deviendrait possible de définir pour les réseaux fossiles les conditions hydrogéologiques qui existaient durant la période de karstification ; ceci permettrait dans une certaine mesure, de dater le karst ;

b) ce mécanisme expliquerait et justifierait l'absence d'indice de surface et la fait que, sauf éboulement de la calotte, le "cavernement" remontant s'arrête à quelques mètres de la surface (dès que la cavité atteint les zones fissurées proches du versant d'air).

CHAPITRE

6

Role du contexte geologique

INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES SUR L'ETABLISSEMENT D'UN RESEAU

PLAN

1 - Rôle de la composition pétrographique de la roche
2 - Rôle de la lithologie
3 - Rôle de la structure géologique
4 - Nature des écrans étanches
5 - Rôle des failles
6 - Complexité de la karstification d'un massif

°
° °

RESUME

La composition chimique et minéralogique de la roche lui donne une vulnérabilité à la corrosion qui peut varier de 1 à 10. La lithologie joue également un rôle important.

Le rôle de la structure de l'unité géologique considérée est évident en particulier lorsqu'elle favorise la création d'un réseau unique bénéficiant d'un bassin versant étendu ; la karstification peut alors être particulièrement développée en raison d'un effet d'échelle.

L'étanchéité d'une formation aux circulations souterraines dépend plus de la nature pétrographique de la formation que de son épaisseur :
- 20 m d'argile représentent un écran efficace ;
- 50 m de marno-calcaires peuvent être franchis par les systèmes karstiques.

Il est difficile de citer des exemples de failles jouant le rôle d'écran entre deux formations calcaires. Dans de nombreuses régions, en particulier dans les zones à structure tabulaire, les réseaux sont calés sur les accidents et orientés par les directions principales de la fracturation.

Dans une même unité géologique, deux caractéristiques du réseau karstique restent généralement très constantes : la morphologie des conduits et la localisation préférentielle des systèmes dans certains niveaux.

CONTRIBUTING GEOLOGICAL FACTORS

SUMMARY

Variations in chimical and mineralogical compositions make rocks differently susceptible to corrosion, in ratios from 1 to 10. Important is also the part of lithology.

Influence of tectonic pattern of the respective geological unit is obvious, especially when it favours the establisment of a single network with a large catchment area. Karstification may then be specially large, through a scale effect.

Underground water tightness (of a rock mass) depends on rock petrography more than series thichness :

A twenty metres thick clay-bed makes an efficient barrier; but a 50 metres marly-calcareous series may be jumped by karstic networks.

It is difficult to name some faults tight-isolating two limestone series. In many areas, specially the ones with tabular pattern, the networks are confined to the major fractures and are directed by the main joint pattern.

In a given geological unit, two characters of the karstic network generally remain quite uniform : pipe morphology and preferential karstic networks localisation in particular beds.

1 - ROLE DE LA COMPOSITION PETROGRAPHIQUE DE LA ROCHE

Toutes les roches calcaires, dont la teneur en $CaCO_3$ est supérieure à 70 %, sont susceptibles d'être karstifiées. C'est une règle simple qui présente des exceptions. La rivière souterraine du PEILLOT (Ariège) par exemple, se développe dans des marno-calcaires dont la teneur en $CaCO_3$ est inférieure à 40 % (1).

Une forte teneur en composants insolubles est cependant un frein au développement des réseaux ; la majorité des grands réseaux se développe dans des formations dont la teneur en $CaCO_3$ est proche de 99 %.

Une cristallisation en gros cristaux est également un frein à la karstification. Les filons de calcite, les fossiles, qui apparaissent en relief sur les parois des cavités mettent en évidence la solubilité plus poussée des calcaires microcristallins qui constituent la matrice de la roche (2). Photo 21.

Enfin, RENAULT (1970) rappelle que les grottes n'existent pas dans les roches où la matrice argileuse isole la fraction calcaire.

2 - ROLE DE LA LITHOLOGIE

A teneur de $CaCO_3$ égale, la karstification est également d'importance très variable suivant la lithologie et la nature des joints d'interstrates.

Les réseaux les plus importants s'observent en général dans des séries constituées par des strates bien individualisées et d'épaisseur moyenne (0,5 à quelques mètres).

La présence de joints argileux ou marno-calcaires de quelques centimètres d'épaisseur entre les bancs est également un facteur favorable.

Il faut noter que les calcaires en bancs d'épaisseur moyenne sont généralement des calcaires à grains fins. Il y a donc deux facteurs favorables à la karstification : la finesse de la pâte et la présence de joints.

Au contraire, les formations en bancs massifs sans joints sont souvent fortement cristallisées (calcaires construits). La karstification dans ces formations nécessite une fissuration intense.

(1) *On suppose que le réseau s'est établi à l'origine dans un banc calcaire de faible épaisseur. Il s'est développé par la suite dans les marno-calcaires qui encadrent le banc calcaire.*

(2) *De nombreuses études ont été faites à ce sujet. Selon la nature de la roche, la vulnérabilité peut varier de 1 à 5 et la vitesse d'attaque spécifique (poids de calcaire attaqué par seconde et par cm2) de 1 à 50, avec 1 pour des calcaires métamorphiques dévoniens et 50 pour des marno-calcaires pliocènes (Verdeil 1960). De même selon, l'échelle de HOUDAILLE et SEMICHON, la vitesse d'attaque est de 1,23 pour la craie, 0,43 pour les calcaires coralligènes et 0,035 pour le marbre. FENELON (1967)*

Dans les séries constituées de bancs de faible épaisseur, les cavités karstiques sont dégradées par les éboulements des voûtes. Ceux-ci consolident les colmatages en constituant un squelette au remplissage argileux. Ces processus freinent la kartification.

3 - ROLE DE LA STRUCTURE GEOLOGIQUE

La structure géologique du massif joue un double rôle :

1) elle favorise plus ou moins l'action des mécanismes de karstification ;
2) elle influence la taille des systèmes karstiques.

Les formations horizontales sont les plus favorables à l'établissement des réseaux. La fissuration (diaclases) qui est le plus souvent perpendiculaire aux joints, est alors verticale. L'enfoncement des eaux est donc facilité et les joints permettent l'établissement des conduits horizontaux dans la zone profonde.

Le réseau de MAMMOTH CAVE (fig. 12, chapitre 2) illustre parfaitement l'importance que peut prendre la karstification dans une série horizontale.

Les séries très redressées sont également favorables à l'enfouissement des eaux;dans ces structures, les circulations horizontales (1) profondes s'établissent dans les mêmes joints stratigraphiques que ceux qui assurent l'enfouissement des eaux ; le réseau se développe donc dans un plan vertical.

Même si la série est de grande épaisseur, ces formations redressées n'affleurent jamais sur d'aussi grandes surfaces que celles des grands plateaux calcaires de structure horizontale ; elles affleurent généralement en bandes ce qui limite, dans de nombreux cas, le volume des apports.

Les structures souples, en particulier les structures synclinales à grand rayon de courbure, ainsi que les structures en plis (type Jura), sont favorables à l'établissement des grands réseaux. Elles favorisent en effet l'établissement d'un réseau unique alimenté par un bassin versant important. La karstification bénéficie alors d'un effet d'échelle (apports notables, réseau noyé important, pérennité des écoulements).

Enfin, les structures complexes, surtout lorsque les séries calcaires sont de faible puissance, paraissent généralement peu favorables à une karstification généralisée.

(1) *Il faut rappeler à ce sujet l'importance des joints horizontaux (chapitre 5, paragraphe 10).*

4 - NATURE DES ECRANS ETANCHES

Les formations géologiques non-calcaires sont les seules limites indiscutables d'une unité karstique (voir chapitre 3 : le problème des bassins versants). Il existe cependant un problème pratique : à partir de quelle puissance une formation marneuse peut être considérée comme constituant en toute certitude un écran étanche ?

Exemples "d'écrans" perméables :

1) Clue de CANELLES (Espagne) : les marnes calcaires de 30 m de puissance, interstratifiées dans la série calcaire, sont franchies par les réseaux karstiques.
2) Les karsts barrés du BAS-LANGUEDOC (P. Dubois 1962) : le drainage de ces unités calcaires tectoniquement isolées par des marnes, implique la traversée d'horizons marneux.

Exemple "d'écrans" étanches :

Le karst bourguignon (France) se développe dans deux séries calcaires horizontales séparées par un niveau argilo-marneux de moins de 25 m de puissance. Aucune liaison à travers l'écran argileux n'a jamais été décelée.

Pour évaluer l'aptitude d'une formation à jouer le rôle d'écran, il faut donc définir avec précision sa nature pétrographique. Cette caractéristique a plus d'importance que la puissance même de la formation.

Une série de calcaires marneux ou même de marnes, de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur doit être considérée comme suspecte (1), alors que quelques mètres d'argile forment, dans certains cas, un écran efficace.

5 - ROLE DES FAILLES

Dans une région karstique, les failles peuvent jouer des rôles multiples. S'il est difficile de trouver des exemples de failles mettant en contact deux unités calcaires et formant un écran étanche, on peut citer en revanche de nombreux exemples de réseaux traversant des failles importantes (ex : Jura : résurgence de SAIZENAY) (fig. 32).

(1) *Il faut toujours étudier attentivement la nature et l'importance des discontinuités de la série (faille, diaclase, cassure) ; il semble en effet que, si la série est découpée d'une façon régulière par des accidents continus, les circulations karstiques s'établissent même si la fraction carbonatée est faible.*

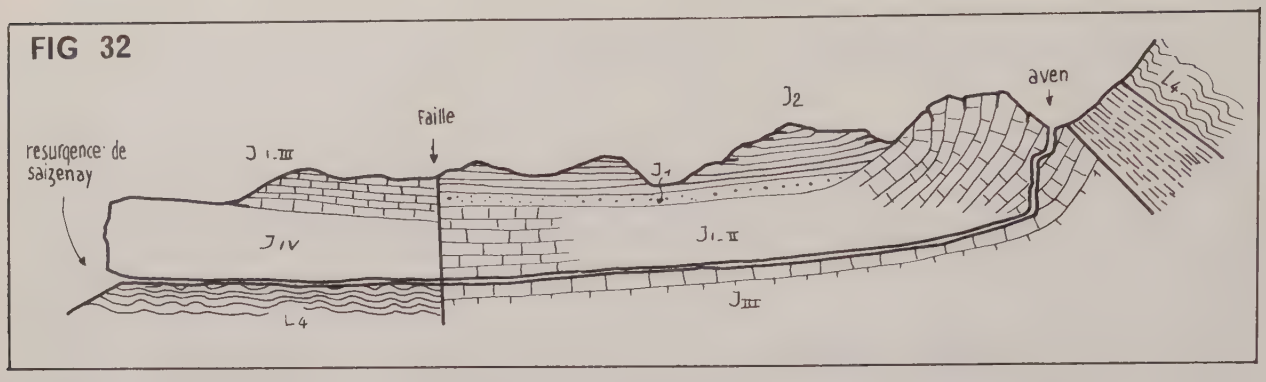


Fig. 32 : Coupe verticale du réseau alimentant la source de SAIZENAY.

Dans certains cas, les failles orientent tout un réseau, Exemple : la rivière souterraine de VAL SUZON qui est la plus grande cavité de la COTE D'OR (France). Le tracé souterrain de cette rivière est rectiligne et suit exactement une faille sur 2 km ; au-delà, le réseau est impénétrable. Le cas de cette rivière illustre d'ailleurs un caractère général à tout le karst bourguignon. Dans cette région, tous les réseaux sans exception sont calés sur les accidents verticaux qui morcellent le plateau calcaire.

On peut citer également les réseaux du VERCORS (France) qui sont étroitement liés à la fracturation du massif.

Enfin, si on considère le réseau du HÖLLÖCH (fig. 12) qui est le plus grand réseau européen connu, on constate que ce réseau se développe dans une structure tectonique complexe caractérisée par la triple superposition de l'Urgonien. Une partie des galeries est localisée dans les zones broyées qui séparent les trois unités tectoniques.

Il faut également signaler que certains réseaux sont calés sur des plis-failles ou sur des flexures (exemple : la CABORNE DE MENOUILLE).

En conclusion, les failles, les grandes cassures, les déformations brutales (type flexure, pli-faille, etc.) doivent retenir l'attention au stade de la prospection, en particulier lorsque l'on est en présence de calcaire pur.

6 - COMPLEXITE DE LA KARSTIFICATION D'UN MASSIF

Par suite du grand nombre de facteurs capables d'influencer la karstification, le réseau karstique réel s'écarte, dans bien des cas, des schémas plus ou moins théoriques définis dans les chapitres précédents.

1) Il peut être inachevé, bloqué à un certain stade de son évolution.

2) Contraint à s'adapter aux structures du massif, certaines de ses parties peuvent être réduites (absence de zone noyée par exemple) ou au contraire hypertrophiées.

3) Il peut être le résultat de plusieurs phases de karstification et par conséquent être composé de plusieurs réseaux plus ou moins superposés et fossilisés.

Cependant, quelle que soit la complexité de l'histoire géologique du massif, on constate que, dans un massif donné, deux caractéristiques de la karstification sont constantes :

1) la localisation des manifestations de la karstification (1) dans certains niveaux stratigraphiques ;

2) la morphologie des conduits karstiques dans un niveau donné.

La localisation des indices dans des niveaux privilégiés est particulièrement nette pour les "karsts de joints" dans les séries peu inclinées. C'est d'ailleurs dans ce dernier cas que les indices sont les plus faciles à observer sur les affleurements naturels (parois de gorges, falaises, ...).

L'existence de ces niveaux privilégiés ne signifie pas que le reste du massif calcaire ne soit pas karstifié. Il est bien évident que la présence de ces indices implique l'existence d'un système karstique et donc des trois zones décrites dans les chapitres précédents (zone d'absorption, zone de transfert, zone de circulation horizontale).

Les niveaux privilégiés observés appartiennent le plus souvent à la zone profonde de réseaux fossiles en raison des caractéristiques géométriques de cette zone (cf. conclusions du chapitre 5).

L'observation de la karstification dans la zone de transfert est beaucoup plus difficile ; c'est pourquoi, il n'est pas possible actuellement de préciser l'influence des caractéristiques de la roche encaissante sur la morphologie et la densité des vides karstiques de cette zone.

En raison du grand nombre de facteurs favorables ou défavorables qui entrent en jeu dans le mécanisme de la karstification, le degré d'évolution karstique d'une zone ou d'un niveau dépend de la superposition ou non dans cette zone ou dans ce niveau de deux ou de plusieurs facteurs favorables. Dans une série inclinée par exemple, la karstification est importante à l'intersection des couches favorables au phénomène et du niveau de base. Dans ce cas, des réseaux linéaires se développent préférentiellement à l'intersection de ces deux plans.

Dans une même unité, la karstification pourra être très inégale d'une zone à une autre.

°
° °

(1) *Cavités vides ou colmatées, concrétions, conduits, niveaux argileux, etc., que l'on désignera sous le terme général d'INDICES KARSTIQUES.*

Conclusion

NATURE DU MASSIF KARSTIFIE

Pour l'ingénieur de génie civil, la karstification est habituellement considérée comme une agression subie par le massif calcaire. Le massif calcaire karstifié lui apparaît comme un massif dégradé, altéré. Cette altération est généralement comprise comme une désorganisation anarchique du massif : élargissement des fissures et des joints, destruction de la matrice rocheuse.

L'étude du milieu karstique, présentée dans les chapitres précédents, éclaire d'un jour différent la nature de la karstification. Les manifestations de la karstification s'ordonnent si on considère que le processus de karstification est étroitement lié à un mécanisme de drainage du massif calcaire ; drainage dont l'originalité est d'être interne du massif et capable d'assurer, à lui seul, l'évacuation des eaux météoriques. Cet aspect du milieu karstique nous a fourni le fil directeur de notre étude, car d'une part, il correspond à une réalité du milieu physique et d'autre part, il est lié directement au problème fondamental de l'étanchéité des retenues - finalité de cette étude. Le réseau karstique apparaît ainsi comme le cadre indivisible de toute manifestation karstique. La signification d'un indice karstique n'apparaît que si on le considère par rapport au réseau.

L'étude et la mesure des caractéristiques de ce réseau montrent que ces caractéristiques présentent une réelle homogénéité et s'ordonnent par rapport à certains critères. L'établissement et l'évolution d'un réseau obéissent à des lois qui se traduisent par des morphologies bien précises, tenant compte de tous les paramètres géologiques. Cette réalité s'oppose nettement à l'idée que la karstification est une altération anarchique du massif.

°
° °

Dans le cadre de l'étude de l'étanchéité des retenues, comprendre la karstification d'une région revient en grande partie à reconnaître comment est organisé le drainage souterrain des massifs calcaires. Inversement, tant qu'il est impossible de préciser comment se drainent et où sont restituées les eaux météoriques, on ne peut prétendre connaître le karst de cette région.

La règle fondamentale qui peut être exprimée est que l'indice karstique doit toujours être considéré comme un élément d'un système karstique,actif ou fossile. Ceci rappelle notamment qu'un indice karstique ne peut être, sauf exception, isolé à l'intérieur de la masse calcaire, c'est-à-dire sans liaison avec un réseau. S'il est isolé, cela ne peut être que dans un cas bien précis : on est alors en présence d'une karstification fossile, déstructurée par des déformations tectoniques.

Dans ce cas,et c'est le seul, si les déformations tectoniques sont importantes, la karstification peut être considérée comme une désorganisation anarchique du massif calcaire.

°
° °

hoto 1 : LE DESERT DE PLATE

ltitude 2 000 m. Alpes calcaires de Haute Savoie. Le rôle fondamental des diaclases apparaît nettement. En surface, l'indice de arstification atteint 25 %. La plupart des fissures se referment rapidement. On peut noter l'influence de la pétrographie sur la orphologie du lapiaz : le banc calcaire 1 est surmonté par un niveau 2 plus marneux dont la pâte est plus fine. La morphologie du anc 2 est plus arrondie et les fissures sont plus espacées. La morphologie de ce lapiaz d'altitude doit peut-être être mise en relation vec l'enneigement important par rapport à la pluie, et avec l'horizontalité de la surface.

Photo 2 : LE POLJE DE SUECH

Haute Provence, altitude 1 200 m. C'est un dépression fermée à fond plat. Le calcaire qu affleure sur les versants est masqué dans le fond par un tapis argileux. Ce tapis assure une étan chéité relative qui permet la formation d'un plan d'eau temporaire en hiver. Sur la photo prise du rant l'hiver 1969, le "lac" est encore gelé. Ce polj alimente selon toute vraisemblance, des source qui sortent dans le versant quelques centaine de mètres plus bas. Un des caractères remarquable de ce poljé est qu'il est situé sur un col. Le niveau de base régional est à la côte 600 environ.

Photo 3 : COUPE ARTIFICIELLE DANS LA ZONE D'ABSORPTION (talus de route)

Calcaire à grains fins en bancs de 0,25 à 1 m d'épaisseur. Les joints sont bien marqués et soulignés par un film argileux de 0,3 à 1 cm d'épaisseur. Cette série contient de nombreuses grottes. Les fissures du lapiaz (L) sont déjà bien refermées à 0,8 m. de profondeur. Au-dessus, la roche exposée au soleil et aux intempéries en raison de la largeur des fissures sur les premiers décimètres, a une patine caractéristique qui apparaît en sombre sur la photo. Le banc 3 est déjà nettement moins fissuré.

hoto 4 : COUPE ARTIFICIELLE DANS LA ZONE D'ABSORP-ON (Talus de route)

lcaire massif, très peu lité, cristallisé en gros cristaux. La ssuration est très serrée près de la surface mais reste anarchique. roche est découpée en blocs de 10 à 20 cm de côté environ. es fissures karstifiées restent superficielles. Les grottes horizon-les sont inconnues dans cette série.

Photo 4 bis : COUPE ARTIFICIELLE DANS LA ZONE D'ABSORPTION (talus de route)

Calcaires purs et massifs. Le lapiaz soulignent sur 3 m environ un réseau de cassures relativement régulier. Les fissures élargies sont remplies d'argile. En profondeur la fissuration devient anarchique et très comparable à celle du rocher visible sur la photo 4.

hoto 5 : COUPE ARTIFICIELLE DANS LA ZONE D'ABSORP-ON (talus de route)

alcaire à pâte très fine, homogène, légèrement marneux. Altéra-on bicolore caractéristique malheureusement peu visible sur la hoto. Bancs réguliers de quelques décimètres d'épaisseur. Les ints qui séparent les bancs correspondent à des changements tervenus dans les conditions de sédimentation ; mais ils n'ont pas ne nature pétrographique différente de celle des bancs. La ssuration est très franche. La karstification dans cette série est portante. En surface, la masse rocheuse est disloquée par le jeu mbiné des fissures et des joints.

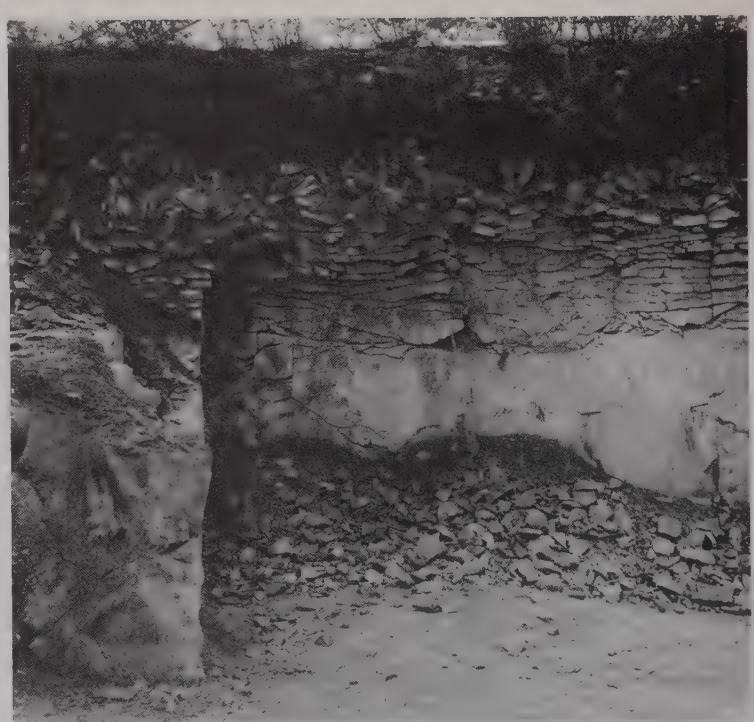
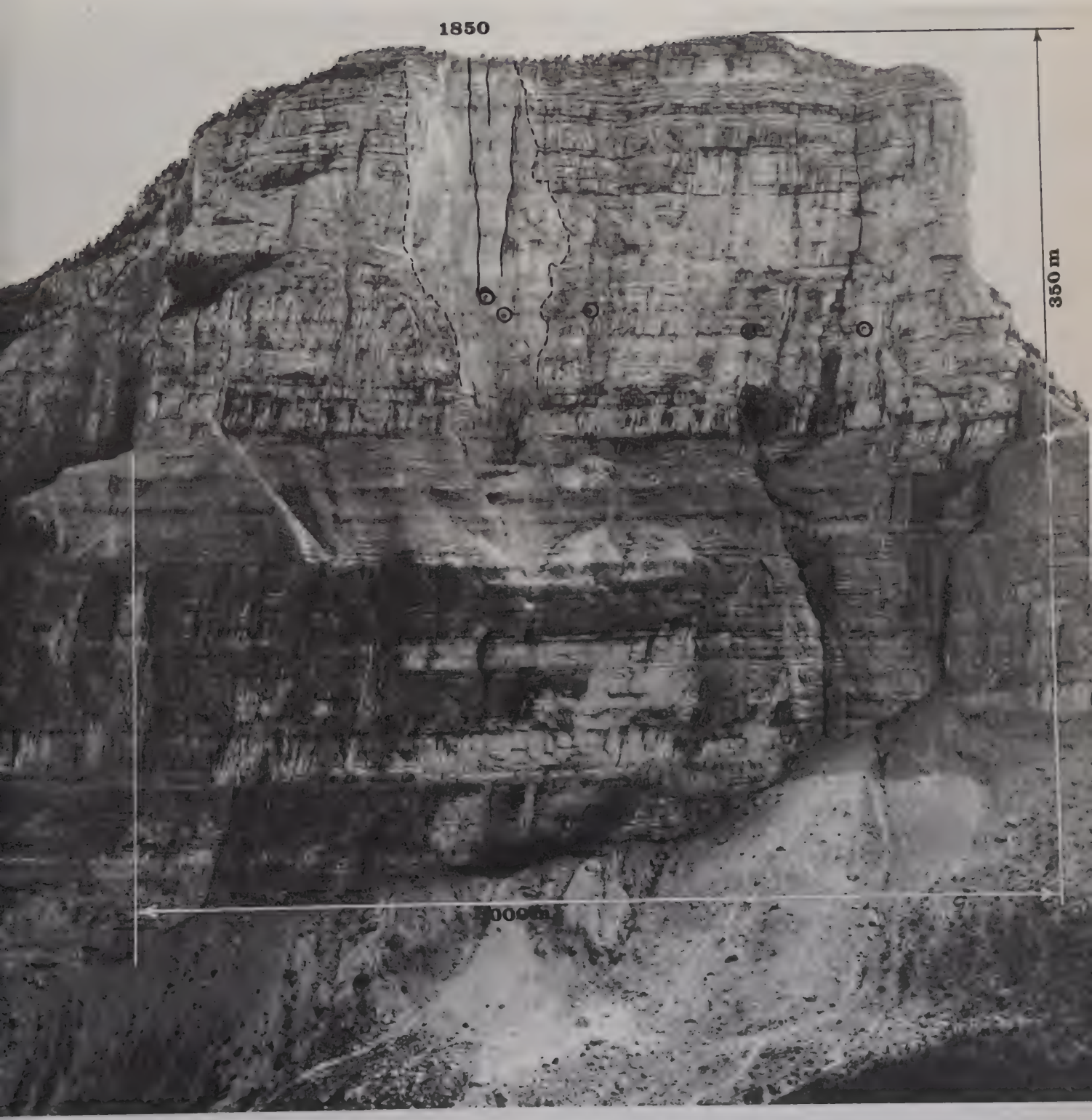


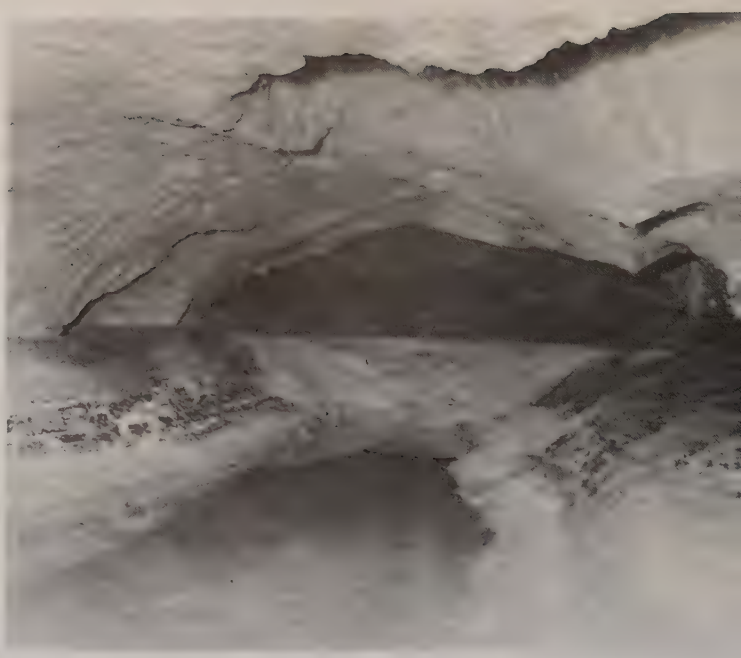
Photo 5 bis : CRYOCLASTIE ET KARST CUTANE (KARST de la région de DIJON (France)

Coupe artificielle dans une carrière.
Calcaire légèrement marneux, massifs. Le litage du calcaire en bancs minces près de la surface n'est pas stratigraphique ; il est dû à l'action répétée du gel et du dégel durant les périodes glaciaires. La limite de séparation avec la roche intacte est nette. Elle correspond à la limite inférieure du dégel. En profondeur, la roche restait gelée en permanence. Dans cette zone de surface "stratifiée" se sont développés, durant les mêmes périodes, des réseaux karstiques appelés "karst cutané".

Photo 6 : LA FACE NORD DU MONT GRANIER

Le plateau situé à 1 850 m est occupé par un lapiaz très évolué. Vers l'année 1245, un éboulement de plusieurs dizaines de millions d
m^3 créa la face actuelle.
La zone plus claire limitée par un pointillé est la trace d'un éboulement récent (1955 ?).
On constate l'existence de quelques grandes fissures qui assurent le transfert vertical des eaux ; ces fissures exceptées, les conduit
karstiques sont peu nombreux et sont tous situés dans une série stratigraphique bien définie. Il faut remarquer que ce niveau correspon
à la rupture de pente dans les zones non perturbée par l'éboulement – exemple : arête de droite.
○ = grotte { = fissure karstique \ (= éboulement 1955

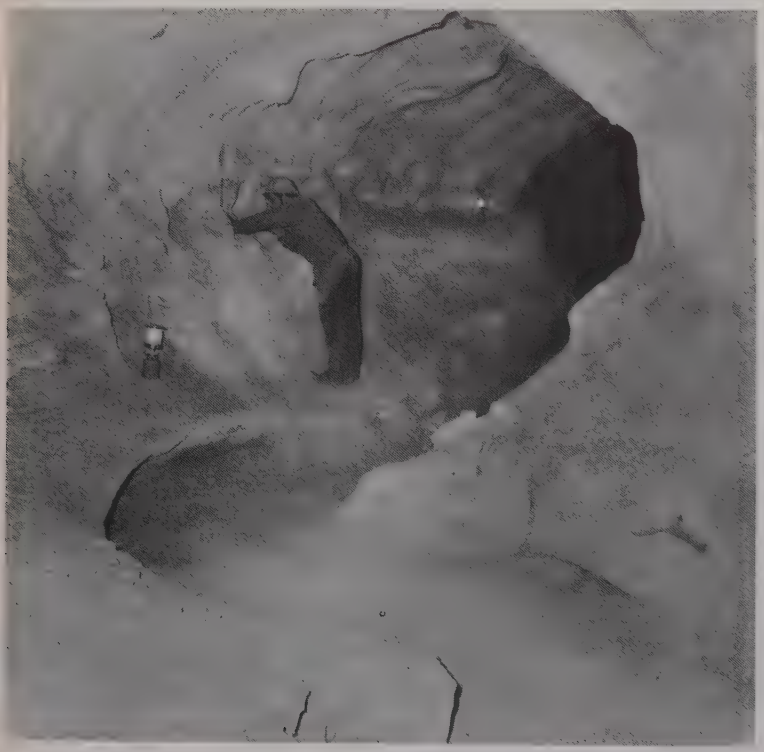

1850
350 m



Photos 7 et 7 bis : KARST DE JOINT (réseau supérieur de Fontaine l'Evêque – Provence)

Morphologie : conduit de joint typique ; *aucune fissure visible en calotte*
Remplissage : argile, absence de concrétion en calotte.
Lithologie : calcaires purs en bancs de 1 m d'épaisseur environ.

Photo 7 bis : Le joint sur lequel est localisé la cavité est plus net il a été largement creusé. La voûte, par endroits, atteint 10 m d portée tout en restant très basse.



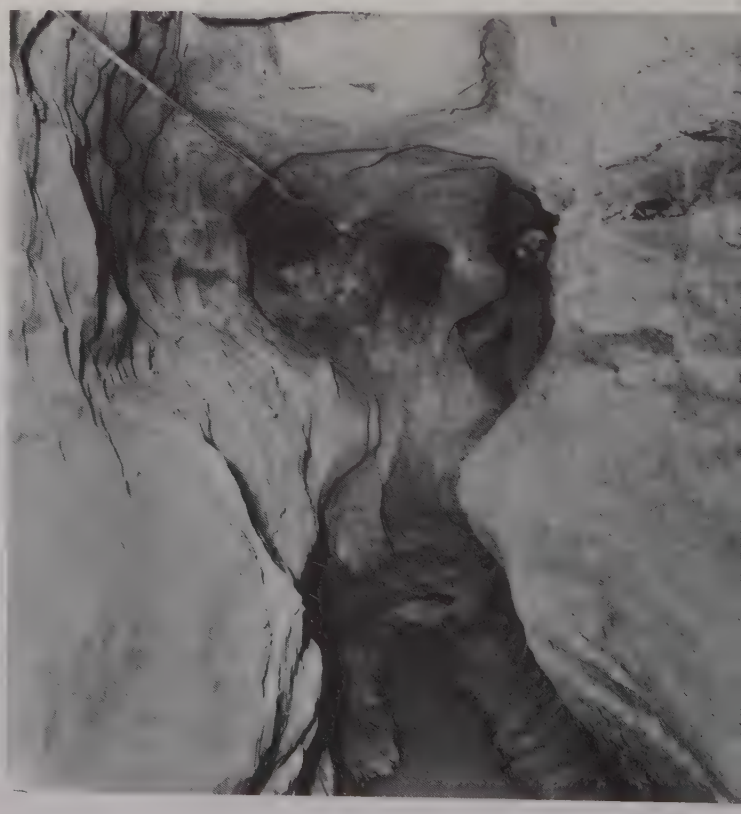


Photo 8 : KARST DE JOINT (Réseau fossile de la grotte de l'Eglise – Gorges du Verdon

Morphologie : conduit de joint ; *très peu de fissures*
Remplissage : quelques cailloux au sol, très peu de concrétions
Lithologie : calcaires purs, massifs, en bancs de plusieurs décimètres
Evolution : surcreusement en écoulement libre en radier.

Photo 8 bis : KARST DE JOINT (réseau supérieur de l CABORNE DE MENOUILLE – JURA)

Le conduit est calé sur un joint, l'écoulement libre a creusé l partie basse. La section est en "trou de serrure". Dans cette parti du réseau, il n'y a ni concrétion, ni dépôt.

←

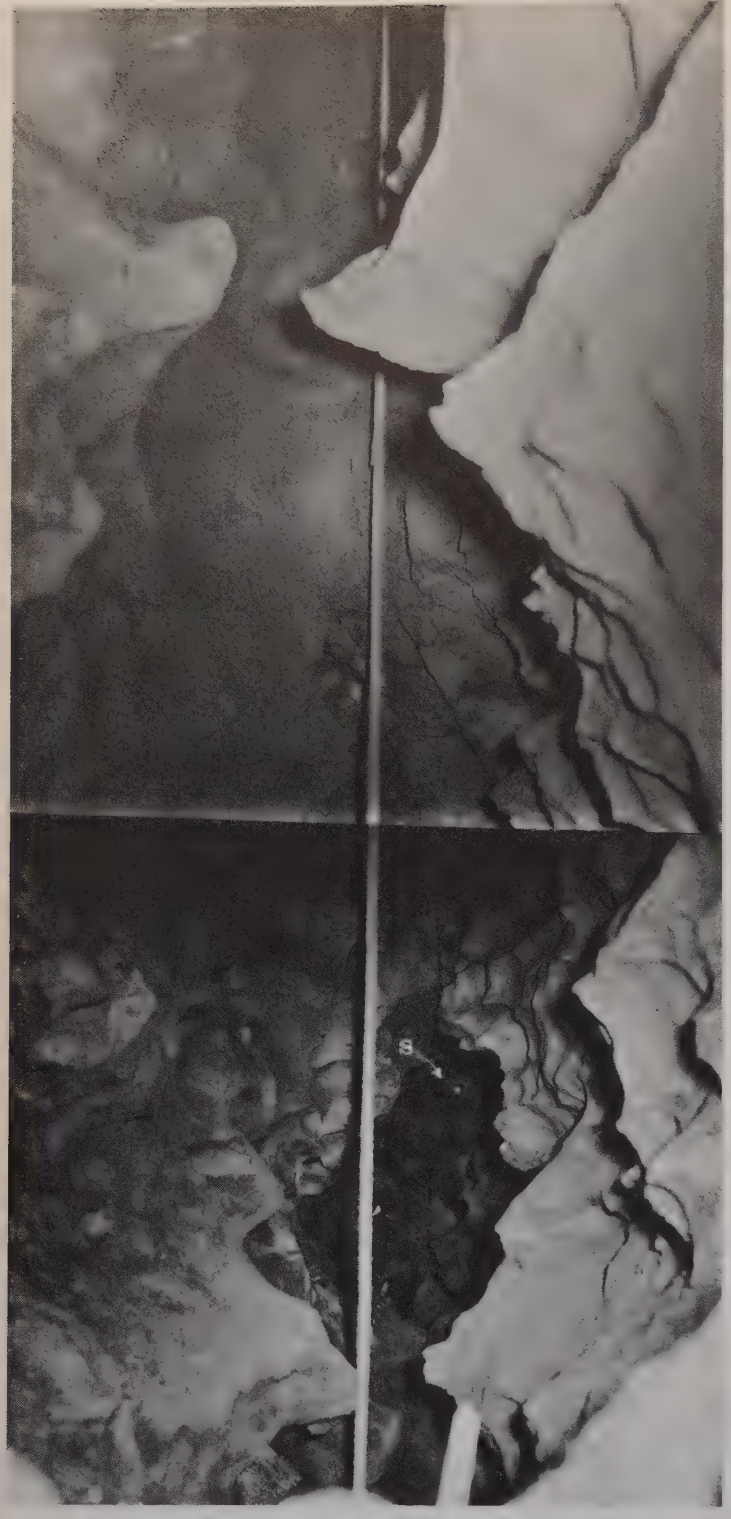
Photo 9 : KARST DE FISSURE (appui rive droite du site du barrage de Gréoux)

Morphologie : karst de fissure *mis à jour par les travaux ; la fissure se ferme vers le haut.*
Remplissage : blocs éboulés, argile.
Lithologie : calcaire légèrement marneux à pâte fine ; bancs épais, altération bicolore.

→

hoto 9 bis : KARST DE FISSURE (Réseau actif de FON-AINE LEVEQUE)

a rivière souterraine – débit moyen 6 m³/s – coule au fond 'un large couloir (1,5 m environ) élargi par la corrosion himique. Cette salle est située sur une faille (rejet 1 m). La salle est développée en hauteur (15 m) grâce à des éboulements, omme en témoignent de nombreux blocs coincés. Au-dessous u niveau du plan d'eau, la section du conduit karstique élargit. Le conduit se développe sur un joint.



←

Photo 10 : KARST DE FISSURE (Appui rive droite du barrage d Gréoux)

Morphologie : karst de fissure *mis à jour par des travaux. La fissu se ferme vers le haut ; nombreuses cupules d'érosion sur les parois*
Remplissage : localement, argile sur les parois ; au fond plancher d cailloutis et d'argile
Lithologie : calcaire légèrement marneux à pâte fine. Bancs épa altération bicolore
Evolution : cette cavité a peut-être été colmatée par de l'argile à un époque antérieure.
– Le spéléologue en S donne l'échelle

→

Figure 11 : KARST DE FISSURE (Réseau W de la Caborne de Menouille (Jura)

Morphologie : karst de fissure
Remplissage : traces d'argile et de graviers sableux sur les parois, énormes blocs provenant de l'éboulement des voûtes
Lithologie : calcaires francs en bancs massifs
Evolution : cette cavité a été à une époque antérieure colmatée à 80 % par des matériaux sablo-graveleux.

Photo 12 : KARST DANS UNE SERIE DE BANCS MINCES – RECOUPE PAR LE FRONT D'UNE CARRIERE (Causses Nord-montpelliérains)

Morphologie : conduit de joint; remarquer le sillon en calotte
Remplissage : argile et blocs éboulés provenant des parois
Lithologie : calcaires en bancs minces *(15 à 30 cm)*
Evolution : la cavité résiste mal à l'élargissement ; les parois s'éboulent
N.B. : L'échelle est donnée par la lampe-torche (L) posée à l'intérieur du conduit.

Photo 13 : EBOULEMENTS DES VOUTES DANS UNE SERIE INCLINEE

Morphologie : très grandes cavités modelées par les éboulements *dans une série à fort pendage.*
Remplissage : argile et blocs énormes provenant des voûtes position du radier rocheux inconnu.
Lithologie : calcaires massifs, pendage 40°
Evolution : cavités de très grande taille creusées par éboulement dissolution.
Appui rive gauche du barrage de Canelles (Espagne).

Photo 14 : EBOULEMENTS DES VOUTES DANS UNE SERIE HORIZONTALE (Grotte du SERGENT – Vallée de l'HERAULT)

Morphologie : cavité modelée par les éboulements *plafond stratigraphique ; blocs au sol*
Remplissage : argile et dalle provenant de l'éboulement du toit, concrefions en calotte (stalactites) et au sol
Lithologie : calcaires en bancs d'épaisseur moyenne (10 à 50 cm)
Evolution : le conduit initial a disparu La position du rocher au radier est inconnue.

Photo 15 : REMPLISSAGE INCOMPLET DANS UN CONDUI HORIZONTAL (Fontaine l'Evêque Var, France)

Morphologie : conduit de joint typique
Remplissage : argile et cailloutis
Lithologie : calcaires massifs
Evolution : le colmatage incomplet laisse passer des circulation en calotte qui érodent peu à peu le remplissage (expérience d mise en charge du réseau).

Photo 16 : PLANCHER DE CALCITE DANS LES CONDUITS HORIZONTAUX (Fontaine l'Evêque)

Morphologie : conduit de joint ; fissures en calotte
Remplissage : plancher de calcite reposant vraisemblablement sur de l'argile, absence totale de concrétion en calotte
Lithologie : calcaires massifs
Evolution : le conduit est peu à peu colmaté par les concrétions.

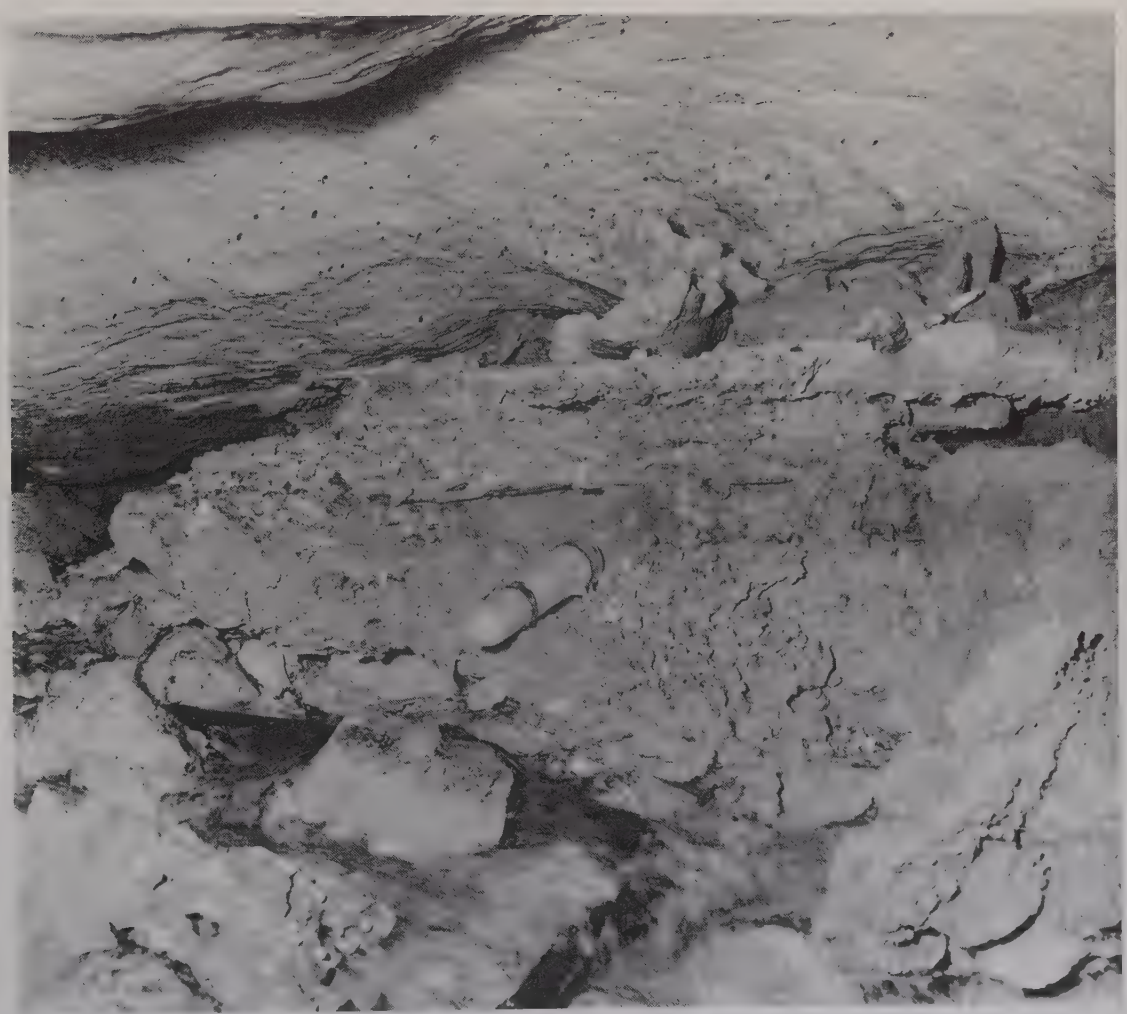


Photo 17 : IMPORTANCE ET NATURE DU REMPLISSAGE, REPRISE D'EROSION

Morphologie : conduit de joint, absence de fissure en calotte
Remplissage : argile, blocs anguleux, graviers recouverts par un plancher de calcite
Lithologie : calcaires massifs
Evolution : le conduit a été colmaté au 3/4 par des apports graveleux ; dans la phase terminale du remplissage, un plancher de calcite s'est constitué au-dessus des dépôts. Les modifications du régime hydraulique ont provoqué ensuite une reprise d'érosion *importante.*

Photo 18 : IMPORTANCE ET NATURE DU REMPLISSAGE, REPRISE D'EROSION (Caborne de Menouille)

Morphologie : conduit de joint ; absence de fissure en calotte
Remplissage : il forme un talus bien visible sur la droite de la photo : argile et planchers de calcite intercalés dans la masse argileuse
Lithologie : calcaires francs en bancs massifs
Evolution : galerie colmatée au 3/4 puis décolmatée. En période de crues, les écoulements dans cette galerie délavent et entraînen l'argile en laissant sur place des fragments de planchers de calcite (bien visibles au sol).

Photo 19 : NATURE DU REMPLISSAGE – EVOLUTION

Morphologie : conduit de joint ; fissures peu nombreuses en calotte
Remplissage : argile, plancher de calcite, stalactites, stalagmites
Lithologie : calcaires francs en bancs épais
Evolution : l'argile a en partie disparu ; les concrétions restent suspendues
Grotte de l'Eglise – Vallée du Verdon rive gauche.

Photo 20 : PLANCHER DE CALCITE SUSPENDU

La coulée de calcite provenant de la fissure s'est déposée sur des matériaux aujoud'hui disparus. L'aspect de la roche suggère un corrosion sous l'argile. Au-dessus du plancher, les cristaux de calcite se sont développés librement sur les parois.
Le crayon donne l'échelle.
Grotte dans le Crétacé rive gauche du Verdon (Basses Alpes).

Photo 18

Photo 19

Photo 20

Photo 21 : CORROSION SELECTIVE (Réseau de FONTAINE L'EVEQUE – salle du ZODIAC)

La roche est un calcaire corraligène ou biodétritique. La matrice rocheuse plus vulnérable est attaquée plus vite que les fossiles bien cristallisés qui apparaissent en relief.

Photo 22 : FORME DE CORROSION (Réseau profond de la GROTTE DE L'EGLISE)

Cette cavité est modelée dans une roche très homogène. L'ensemble des caractéristiques du réseau permet de considérer que cette morphologie est le résultat de l'érosion chimique en zone noyée. La vitesse de circulation de l'eau devait être très faible.

Photo 23 : ROLE DES FAILLES (Alpes calcaires – Suisse)

Localisation d'une perte sur une faille. Le petit lac situé à droite sur la photo, existe grâce à l'étanchéité relative des marno-calcaires stratifiés. L'établissement de la perte qui joue un rôle de trop-plein a été favorisé par la faille et par les fractures ainsi que par la nature pétrographique des calcaires massifs, pauvres en insolubles.

2eme
partie

LES RETENUES
monographies

2me PARTIE

LES RETENUES - MONOGRAPHIES

plan

	Pages
Chapitre 1 : Généralités	3
Chapitre 2 : La retenue du barrage de CAMARASA	15
Chapitre 3 : La retenue du barrage de BOUVANTE	29
Chapitre 4 : La retenue du barrage de MONTEJAQUE	41
Chapitre 5 : La retenue du barrage de GENISSIAT	51
Chapitre 6 : La retenue du barrage de CHARMINE-MOUX	62
Chapitre 7 : La retenue du barrage de CASTILLON	77
Chapitre 8 : La retenue du barrage de LA CHAUDANNE	95
Chapitre 9 : La retenue du barrage de CANELLES	103
Chapitre 10 : La retenue du barrage de KARAOUN	119
Chapitre 11 : La retenue du barrage de NEBAANA	143
Chapitre 12 : La retenue du barrage de GREOUX	165
Chapitre 13 : La retenue du barrage de VOUGLANS	181
Chapitre 14 : Les retenues des barrages de CEYRAC et de CONQUEYRAC	193
Chapitre 15 : 15a : CEYRAC - 15b : CONQUEYRAC	205-211
Chapitre 16 : La retenue du barrage de QUINSON	217
Chapitre 17 : La retenue du barrage de SAINTE CROIX	231

REMARQUES GENERALES :

- *Bibliographie : Pour chaque retenue, la bibliographie est citée en tête du chapitre correspondant.*

- *Figures : Pour chaque nouveau chapitre, les figures sont numérotées à partir de 1.*

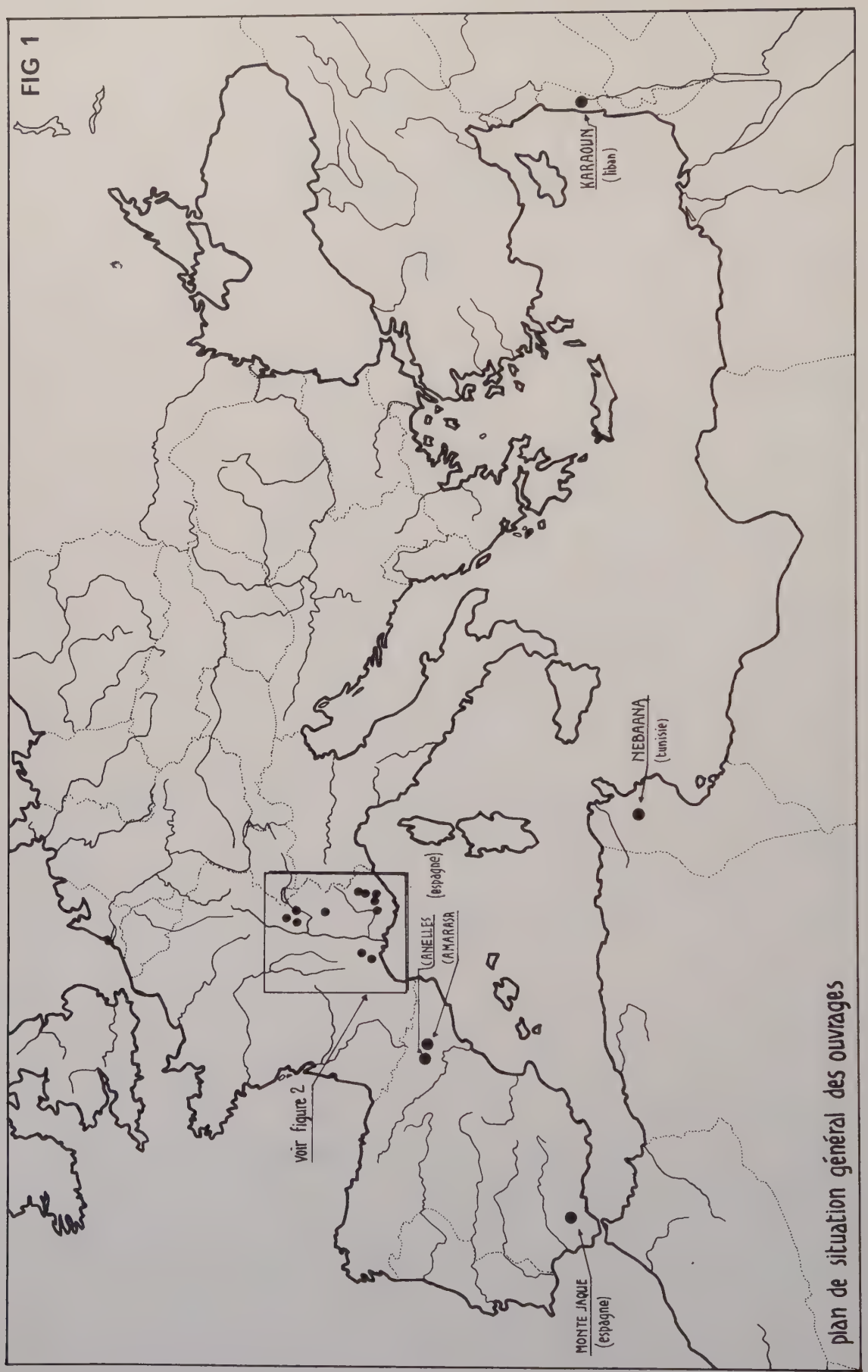


FIG 1
KARAOUN
(liban)
NEBAANA
(tunisie)
CANELLES
(espagne)
CAMARASA
voir figure 2
MONTE JAQUE
(espagne)
plan de situation général des ouvrages

CHAPITRE

1

généralités

PLAN

1 - Liste et localisation géographique des retenues étudiées
2 - Ordre de présentation
3 - Buts poursuivis, plan adopté
4 - Remarques sur certaines caractéristiques
5 - Lignes de fuites - Périmètres de fuites - Surfaces mouillées
6 - Les documents dessinés, échelles, conventions générales

°
° °

Figure 1 : Plan de situation général des ouvrages
Figure 2 : Plan de situation des ouvrages français
Figure 3 : Construction des périmètres de fuite
Figure 4 : Périmètres de fuite : canyon
Figure 5 : Périmètres de fuite : rive convexe
Figure 6 : Périmètres de fuite : rive concave
Figure 7 : Périmètres de fuite : rives à 90° ($\alpha = 90°$)
Figure 8 : Périmètres de fuite : rives $\alpha < 90°$
Figure 9 : Périmètres de fuite ; structure hétérogène
Figure 10 : Surfaces mouillées

RESUME

La deuxième partie est constituée par les monographies de 16 retenues de barrages. Onze, parmi ces 16 retenues sont situées en FRANCE : BOUVANTE, GENISSIAT, CHARMINE-MOUX, CASTILLON, CHAUDANNE, GREOUX, VOUGLANS, CEYRAC, CONQUEYRAC, QUINSON, SAINTE-CROIX, 3 en ESPAGNE : CAMARASA, MONTEJAQUE, CANELLES, 1 au LIBAN : KARAOUN, 1 en TUNISIE : NEBAANA.

Ces monographies sont présentées dans l'ordre chronologique de leur mise en eau.

Afin de pouvoir comparer facilement ces différentes retenues entre elles, toutes les monographies sont rédigées suivant un plan commun et les documents dessinés sont à des échelles très voisines.

Une caractéristique nouvelle a été définie : le périmètre de fuite. Cette donnée géométrique tient compte de la topographie des rives, de la position et de la hauteur de l'ouvrage et, si cela est nécessaire, de l'extension du voile d'étanchéité. Elle permet d'évaluer l'importance d'un indice karstique par rapport au projet. Cette caractéristique permet également de décomposer les surfaces mouillées suspectes en zones de vulnérabilité décroissante.

°
° °

SUMMARY

Part two consists of monographs on 16 storage dams. Eleven are in FRANCE (BOUVANTE, GENISSIAT, CHARMINE-MOUX, CASTILLON, CHAUDANNE, GREOUX, VOUGLANS, CEYRAC, CONQUEYRAC, QUINSON, SAINTE CROIX), three in SPAIN (CAMARASA, MONTEJAQUE, CANELLES), one in LEBANON (KARAOUN) and one in TUNISIA (NEBAANA).

They are reviewed in chronological order of impounding.

To facilitate comparison, all the monographs are written on the same pattern and figures are at more or less the same scale.

A new parameter is defined - leakage. This is a geometric feature refering to the topography of the lake shores, the position and height of the dam and, if necessary, the length of the grout curtain. It is used to appraise the importance of karst indications as they affect the project and break down suspect submerged areas into zones of decreasing vulnerability.

1 - LISTE ET LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES RETENUES ETUDIEES

Cette deuxième partie est constituée par les monographies géologiques et hydrogéologiques de 16 retenues de barrages, situées dans des régions karstiques.

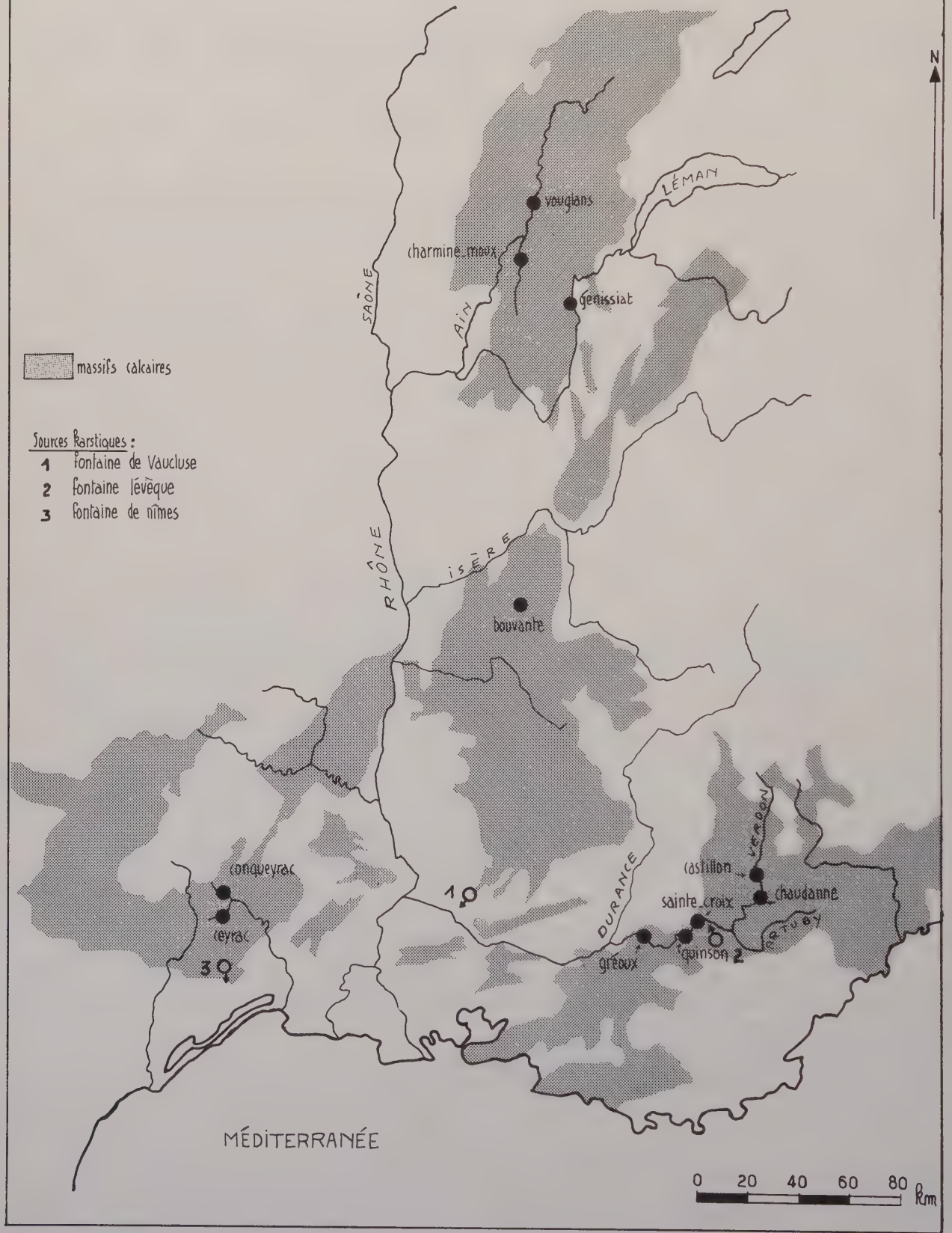
Ces retenues sont celles des barrages suivants :

Chapitres	Barrages	Date de la mise en eau	Type de l'ouvrage	Hauteur	Maître d'Oeuvre
2	CAMARASA	1920	poids	92 m	F.E.C.
3	BOUVANTE	1925	voûte	38 m	E.D.F. (1)
4	MONTEJAQUE	1932	voûte	73,5 m	
5	GENISSIAT	1948	poids	104 m	C.N.R.
6	CHARMINE-MOUX	1949	poids	18 m	E.D.F. (1)
7	CASTILLON	1949	voûte	100 m	E.D.F. (1)
8	CHAUDANNE	1952	voûte	70 m	E.D.F.
9	CANELLES	1951	voûte	148 m	E.N.H.E.R.
10	KARAOUN	1962-67	enrochement	60 m	O.N.L.
11	NEBAANA	1965-69	enrochement	62,5 m	D.H.E.R.
12	GREOUX	1967	enrochement	64 m	E.D.F.
13	VOUGLANS	1968	voûte	130 m	E.D.F.
15a	CEYRAC	1968	poids	20 m	Conseil général du département du Gard
15b (P)	CONQUEYRAC	projet	enrochement	17 m	
16 (C)	QUINSON	prévu 1974	voûte	54,5 m	E.D.F.
17 (C)	SAINTE CROIX	prévu 1974	voûte	95 m	E.D.F.

(P) projet
(C) ouvrage en construction
(1) Ouvrage étudié et réalisé en totalité ou en partie avant la création d'Electricité de France ; exploité et surveillé aujourd'hui par E.D.F.
O.N.L. : Office National du Litani
C.N.R. : Compagnie Nationale du Rhône
F.E.C. : Fuerzas Electricas de Cataluna S.A.
D.H.E.R. : Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural

° ° °

FIG. 2 plan de situation des ouvrages français



- Localisation

Les cartes, fig. 1 et 2, situent géographiquement les retenues citées : 9 retenues sont situées dans les Alpes Françaises, 2 dans les Causses Méditerranéens du Sud de la France, 3 en Espagne, 1 en Tunisie, et 1 au Liban.

2 - ORDRE DE PRESENTATION

L'ordre de présentation des monographies est l'ordre chronologique de mise en eau des ouvrages. Cet ordre de présentation a été choisi pour la raison suivante : d'une manière directe ou indirecte, l'expérience acquise sur un projet est très généralement utilisée sur les projets ultérieurs. Cet ordre permet donc de mieux comprendre pourquoi telle caractéristique systématiquement mesurée aujourd'hui peut avoir été ignorée au cours des études sur un aménagement étudié et réalisé à une époque antérieure. Il souligne également l'évolution des techniques d'étude et de traitement .

3 - BUTS POURSUIVIS - PLAN ADOPTE

Chaque retenue a été étudiée en fonction d'un double but :

1) Tirer partie de l'expérience réalisée ;
2) Etre en mesure d'effectuer, toutes les retenues étant étudiées, un bilan comparatif.

Pour faciliter le bilan comparatif, il était souhaitable que toutes les monographies soient présentées selon un plan commun, et que les documents dessinés soient dans la mesure du possible immédiatement comparables.

Le plan adopté a donc été le suivant :

1) GENERALITES :
   . Introduction
   . Caractéristiques des ouvrages et de la retenue
   . Problème de l'étanchéité
   . La karstification régionale

2) LE CADRE NATUREL
   . Morphologie
   . Géologie
   . Karstification
   . Hydrogéologie

- Problèmes de l'étanchéité
   . Formations suspectes
   . Lignes de fuites
   . Surface mouillée

3) TRAVAUX D'ETANCHEITE - MISE EN EAU

4) CONCLUSIONS, COMMENTAIRES

4 - REMARQUES SUR CERTAINES CARACTERISTIQUES

Toutes les caractéristiques sélectionnées jouent un rôle direct ou indirect dans le problème de l'étanchéité.

● LA HAUTEUR DE L'OUVRAGE joue un rôle important en raison du fait qu'elle définit la pression statique qui s'exercera le cas échéant sur les colmatages naturels ou artificiels.

● Il a paru nécessaire de préciser LE TYPE DE L'OUVRAGE (barrage béton ou barrage en matériau naturel). En effet, les barrages en enrochement ou en terre masquent une surface importante du terrain naturel à l'aval de l'écran étanche, non seulement sur les rives, mais également dans le lit de la rivière. Pour ces ouvrages, le cheminement des eaux qui apparaît au pied de la recharge aval sera difficile à déterminer et pourra mettre en cause soit l'étanchéité de l'ouvrage, soit celle du terrain naturel.

5 - LIGNES DE FUITES - PERIMETRES DE FUITES - SURFACES MOUILLEES

Pour les projets récents, deux caractéristiques géométriques spécifiques du problème des fuites ont été définies. Il s'agit, d'une part des périmètres de fuites, et d'autre part des surfaces mouillées (1).

● PERIMETRE DE FUITE

Il est courant pour un site donné de parler de lignes de fuites courtes ou longues. C'est une notion qui s'impose souvent d'elle-même. Cependant, il a paru plus logique d'essayer d'enlever à cette notion ce qu'elle a de subjectif.

Dans ce but, nous proposons la construction géométrique suivante : considérons un site quelconque défini par le barrage et par la courbe de niveau correspondant à la cote de remplissage maximum (c'est en effet pour cette cote que les lignes de fuites sont les plus courtes).

(1) *Il n'a pas toujours été possible d'effectuer ce travail pour les projets anciens, les documents de base (et notamment les levers géologiques des zones actuellement noyées) étant trop imprécis.*

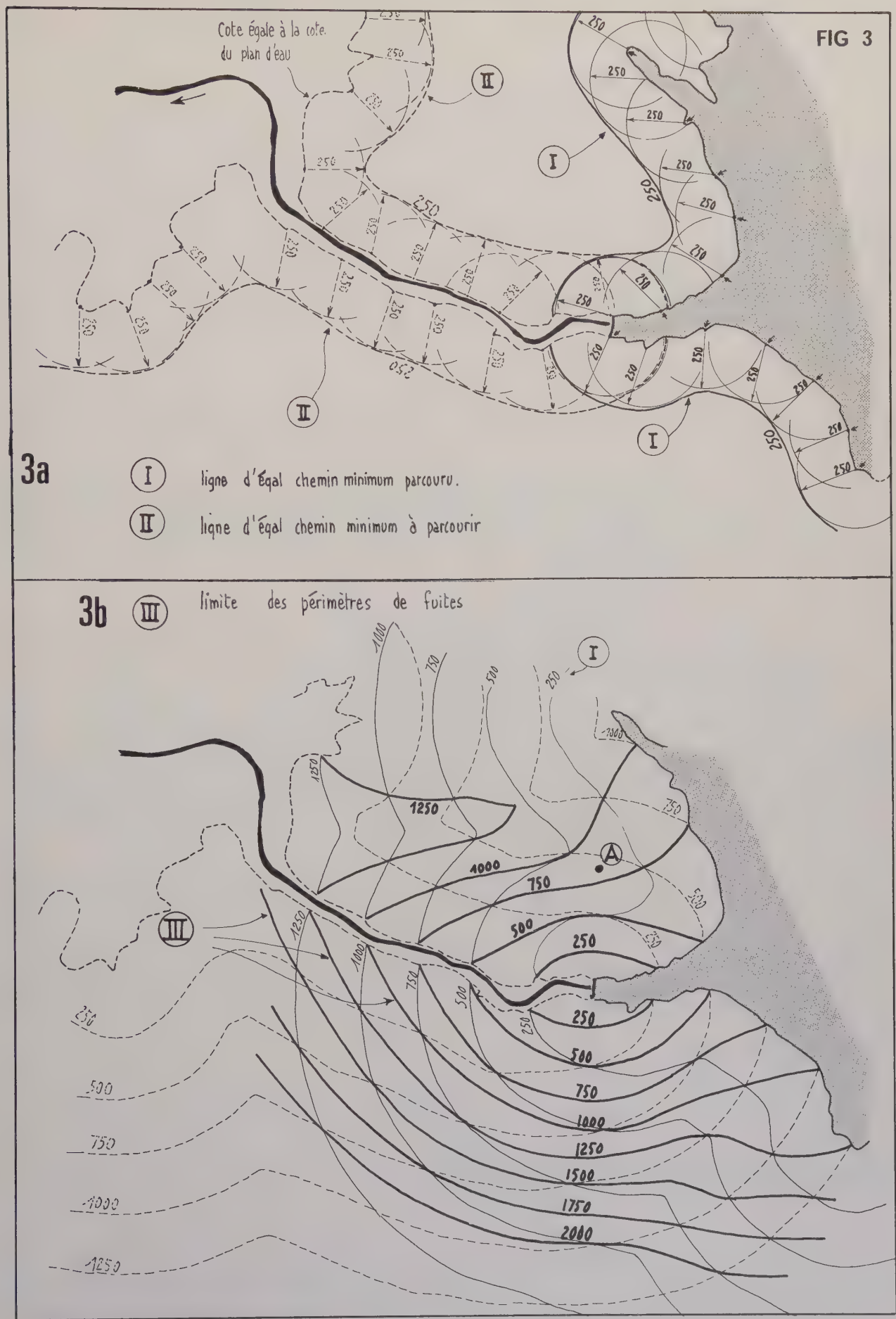


FIG 3
Cote égale à la cote du plan d'eau
I
II
250
3a
I ligne d'égal chemin minimum parcouru.
II ligne d'égal chemin minimum à parcourir
3b
III limite des périmètres de fuites
A
1000
750
500
1250
1500
1750
2000

A partir de ce schéma, on effectue les constructions suivantes :

1°)

On construit, à partir du bord de la cuvette, les lignes d'égal chemin minimum parcouru (fig. 3a).

Chaque ligne d'égal chemin minimum parcouru (250 m, 500 m, etc.) est l'enveloppe des cercles centrés sur la courbe de remplissage maximum du réservoir et de rayon égal aux différentes distances.

Une goutte d'eau, provenant de la retenue, située sur la courbe 250 (par exemple) aura parcouru au minimum 250 m.

2°)

De la même manière, on construit les lignes d'égal chemin minimum à parcourir (fig. 3a).

Chaque ligne d'égal chemin minimum à parcourir (250 m, 500 m, etc.) est l'enveloppe des cercles centrés sur la courbe de niveau qui prolonge, à l'aval du barrage, la courbe de niveau de remplissage maximum. Une goutte d'eau provenant de la retenue et située sur la courbe 500 par exemple, devra parcourir 500 m au minimum pour sortir dans le versant.

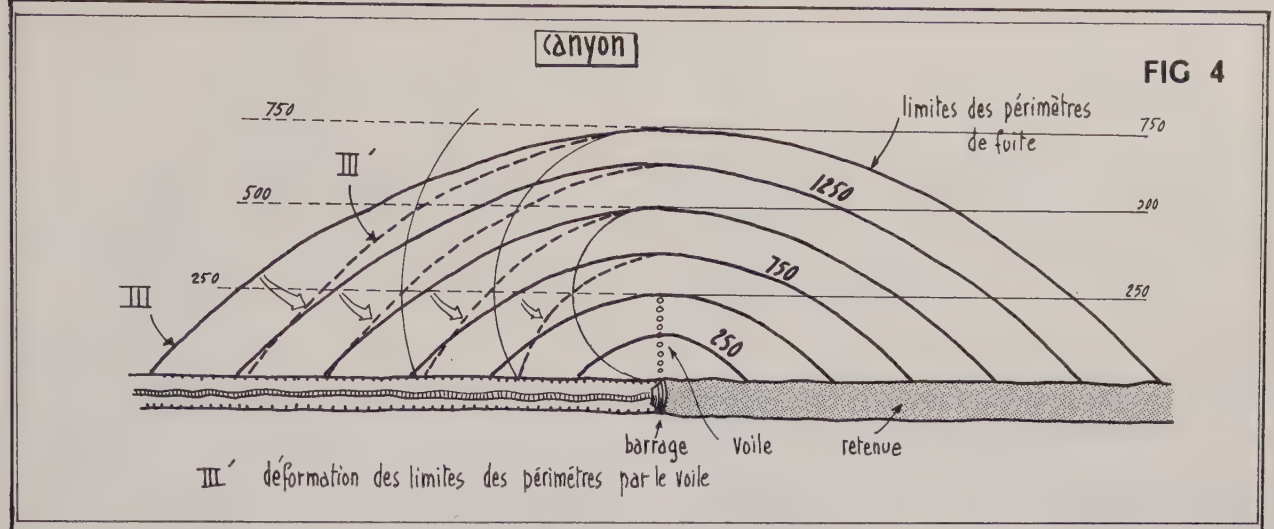
3°)

Périmètre de fuites (fig. 3b) : à partir de ces deux familles de courbes, il est possible de définir des périmètres de fuites.

En effet, si on réunit les points d'intersection des deux réseaux de courbe qui ont le même total (par ex. : 750 = 500 + 250 - 250 + 500, 750), on obtient une courbe qui limite une surface à l'intérieur de laquelle une circulation amont-aval suivant un parcours en ligne droite ou brisée peut aller de la retenue à l'aval en moins de 750 m. Au-delà de la ligne 750 par contre, il est impossible à une circulation passant par exemple par le point A (fig. 3b) de court-circuiter le barrage avec un trajet inférieur à 750 m.

Les figures 4, 5, 6, 7, 8 montrent la forme des périmètres de fuites pour les types de vallées les plus caractéristiques.

- *Canyon linéaire : fig. 4. Dans ce cas, on démontre que les courbes qui limitent les périmètres de fuites sont des arcs de parabole. Sur la fig. 4, le barrage est prolongé par un voile de 250 m, l'influence du voile déforme les limites des périmètres de fuites : III ⟶ III'.*
- *Rive convexe : fig. 5.*
- *Rive concave : fig. 6.*
- *Rive à 90° : fig. 7. Dans ce cas, les périmètres de fuites sont limités par des droites.*
- *Rive faisant un angle aigu : fig. 8. Les périmètres de fuites sont également limités par des droites.*


canyon
FIG 4
750
500
250
III'
III
limites des périmètres de fuite
1250
750
250
barrage
voile
retenue
III' déformation des limites des périmètres par le voile

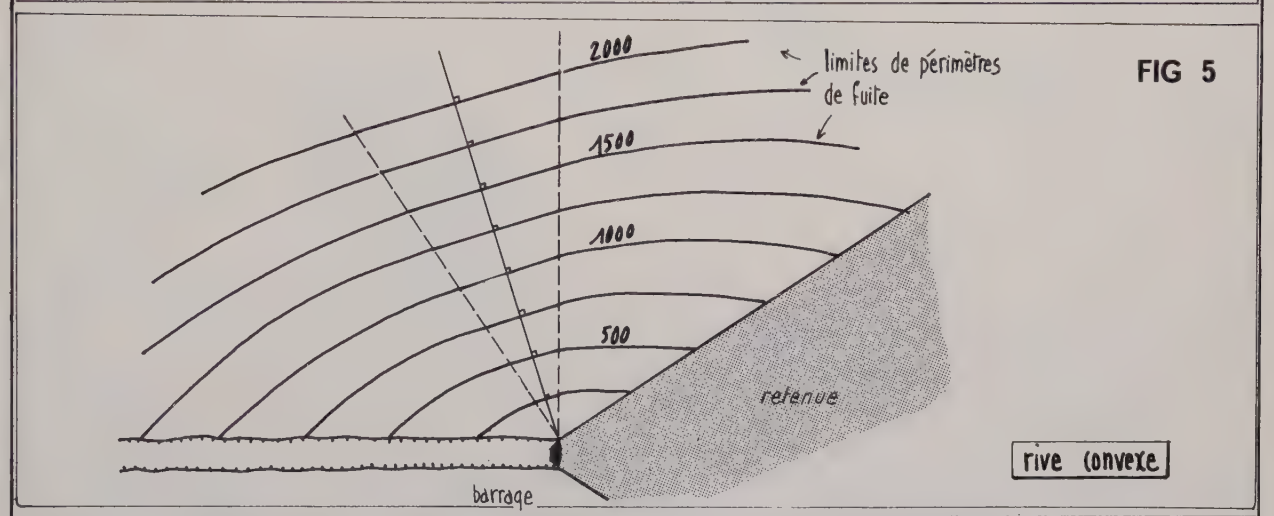


FIG 5
2000
1500
1000
500
limites de périmètres de fuite
retenue
barrage
rive convexe

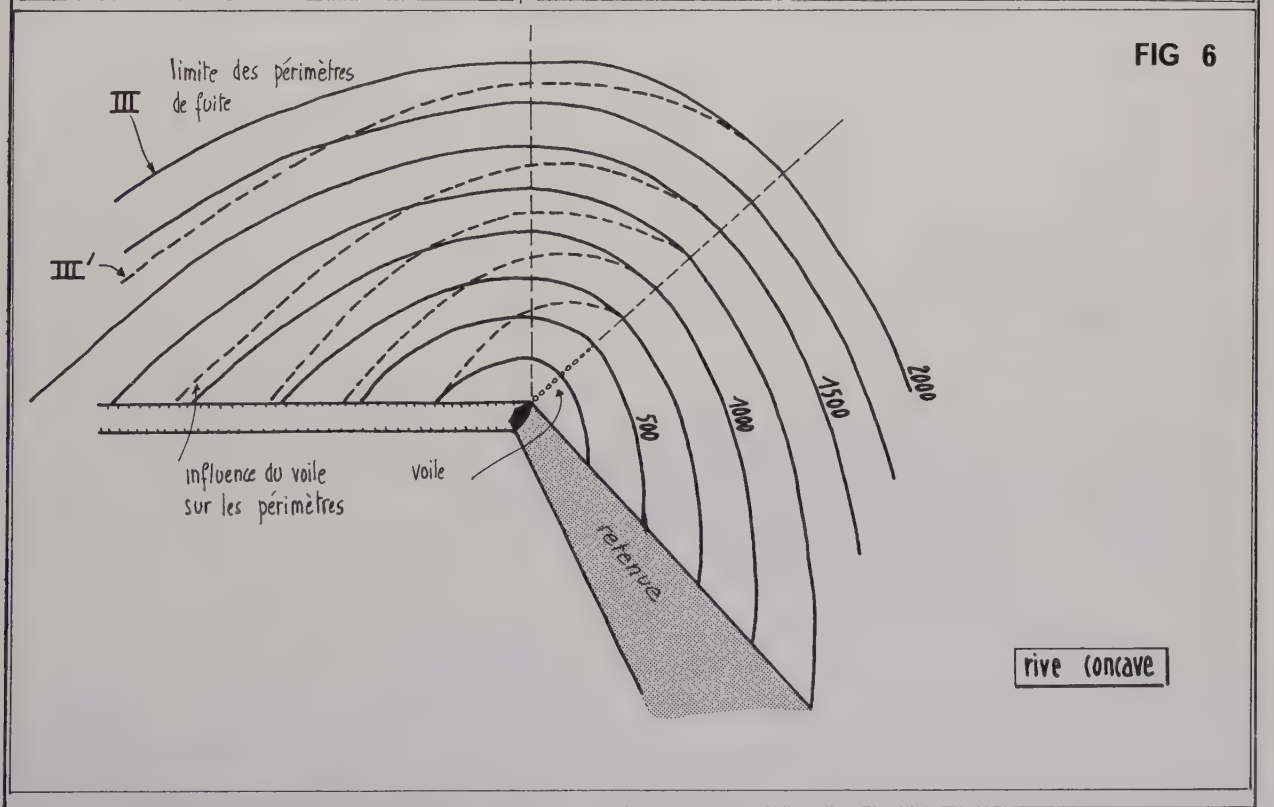
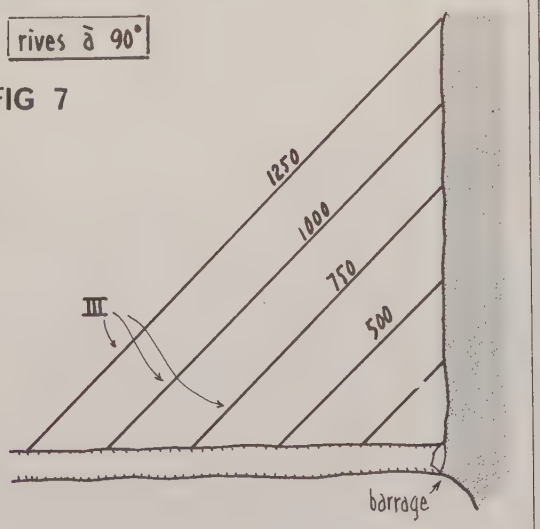


FIG 6
III
III'
limite des périmètres de fuite
influence du voile sur les périmètres
voile
500
1000
1500
2000
retenue
rive concave

rives à 90°

FIG 7



rives $\alpha < 90°$

FIG 8

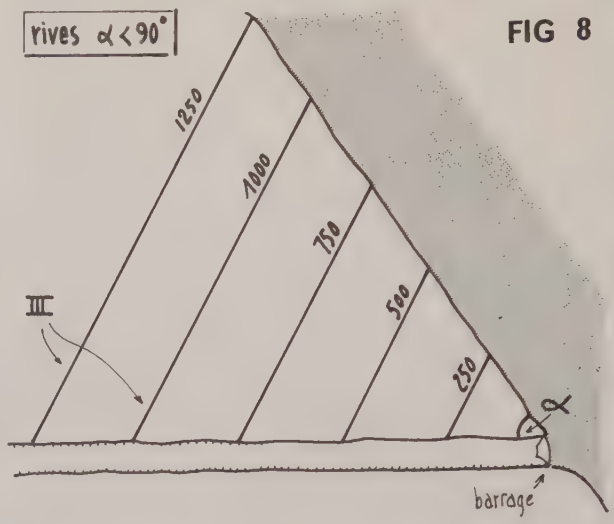
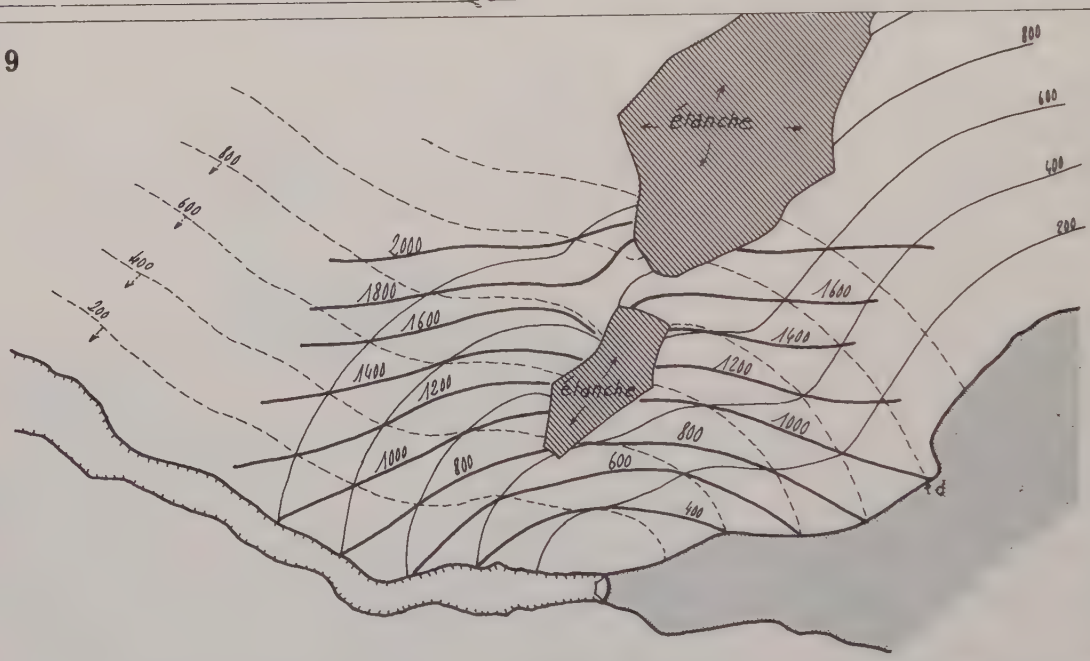
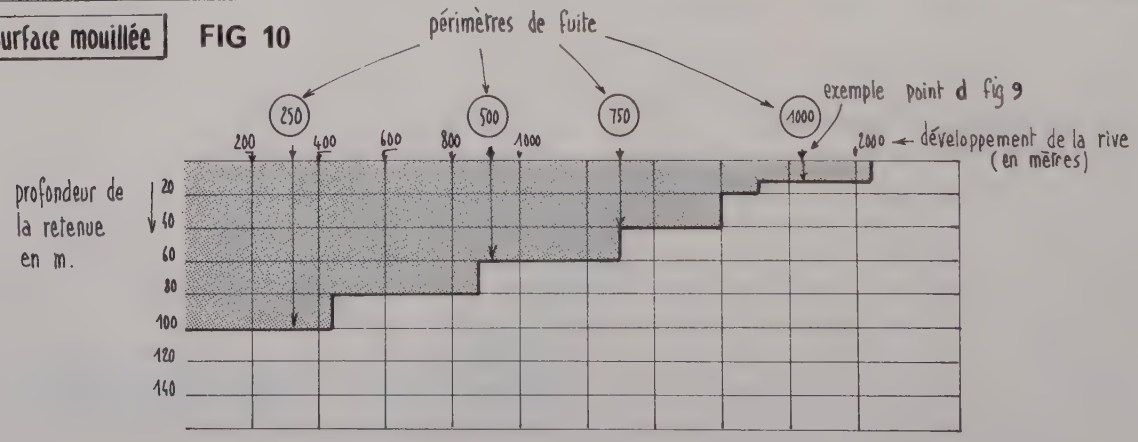


FIG 9



surface mouillée

FIG 10



Pour chaque cas, on peut construire l'influence d'un voile au large : fig. 4, fig. 6. On constate aisément que le voile au large rapproche du barrage les périmètres des lignes de fuites. On constate également que son influence est beaucoup plus réduite pour les lignes de fuites longues.

● Structure hétérogène

Les constructions élémentaires qui viennent d'être faites supposent le milieu constitué en totalité par des roches fissurées suspectes.

Lorsque la structure comprend des formations étanches constituant de véritables écrans, il est toujours possible de construire les périmètres de fuites : exemple fig. 9. Dans le cas de cette figure, le terrain est supposé arrasé à la cote de la retenue. Les lignes d'égal chemin minimum sont évidemment déformées par l'existence d' "îles" étanches, la ligne droite n'étant plus le plus court chemin pour aller d'un point à un autre. Les périmètres de fuites se construisent comme dans les cas précédents et sont évidemment également déformés.

● Utilisation pratique

La construction des périmètres de fuites pour un site donné permet :

- de localiser un indice karstique - aven, grotte - par rapport au barrage ;
- de localiser également les zones d'absorption ou de résurgence.

Il faut rappeler que les périmètres indiquent une valeur minimum du cheminement nécessaire pour aller de la retenue au point considéré.

Cette construction a, par ailleurs, le grand mérite de tenir compte :

- de la position du barrage,
- de sa hauteur,
- de la morphologie de la retenue,
- de la morphologie de la vallée à l'aval du barrage,
- du voile d'étanchéité.

La figure obtenue est donc caractéristique du projet.

● SURFACE MOUILLEE

La surface mouillée est la surface des terrains suspects noyés par la retenue. Dans certains cas, elle peut être égale à la surface totale de la retenue. Il est bien évident que théoriquement le risque de fuites est proportionnel à la profondeur, en raison de la pression grandissante qui s'exerce sur les fissures, et inversement proportionnel à la longueur des lignes de fuites.

Pour ces deux raisons, le diagramme suivant a été adopté (fig. 10) en tenant compte de la profondeur et de la longueur minimum des cheminements possibles à partir d'une zone. La surface mouillée est donc décomposée en surface élémentaire compte tenu de la longueur de lignes de fuites minimum et de la profondeur de la retenue.

6 - LES DOCUMENTS DESSINES - ECHELLES - CONVENTIONS GENERALES

• CHOIX DES ECHELLES (1)

Toutes les monographies (sauf CAMARASA) sont illustrées par une carte ou un schéma géologique(dont l'échelle est voisine du 1 : 20 000 ou du 1 : 25 000). Ces documents permettent de situer l'importance de l'ouvrage et l'extension géométrique des problèmes de l'étanchéité (longueur des lignes de fuites, etc.). Cette carte est le plus souvent le document de base. L'échelle retenue permet en général de porter en vraie grandeur toutes les informations intéressant le problème de l'étanchéité.

L'utilisation de deux échelles, 1 : 20 000 et 1 : 25 000, est due au fait que l'Institut Géographique National a, dans un passé récent, abandonné le rapport 1 : 20 000 en faveur du 1 : 25 000. En conséquence, selon des régions, l'une ou l'autre des deux couvertures est disponible.

Pour certaines retenues, des cartes dessinées à des échelles plus grandes (voisines de 1 : 5 000) ont été nécessaires pour représenter les phénomènes observés à proximité de l'ouvrage.

Les cartes ou les schémas géologiques localisant une retenue dans son contexte karstique régional sont à des échelles variables (1 : 200 000 à 1 : 50 000). Cette nécessité est due au fait que certains projets sont dans des unités karstiques de petite taille : ex. VOUGLANS; d'autres dans des unités très vastes : ex. KARAOUN, SAINTE CROIX.

• CONVENTIONS POUR LES FIGURES

Pour les cartes et dans le même souci de rendre possible une comparaison immédiate, les conventions suivantes ont été adoptées :

1) Les formations karstiques sont en blanc ou en figuré "briquette"; exceptionnellement une trame grise (pointillée) très claire a été utilisée lorsqu'il était nécessaire de distinguer les zones karstiques des zones où la géologie n'est pas représentée.
2) Les formations indiscutablement étanches sont en rayures.
3) Pour les pointillés, comme pour les rayures, plus la teinte générale est sombre, plus la formation est étanche.

Pour les coupes géologiques, les trois conventions précédentes restent valables mais les calcaires karstiques sont le plus souvent représentés par le figuré classique en "briquette".

(1) *Les nécessités de l'impression ont parfois imposé une réduction de certains documents. Les rapports de réduction sont donc légèrement différents d'une monographie à l'autre. Dans les monographies, les échelles indiquées sont les échelles avant réduction éventuelle.*

CHAPITRE

2

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Camarasa

(Espagne)

PLAN

1 - Généralités
- Introduction
- Problème de l'étanchéité
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue

2 - Le cadre naturel

3 - Mise en eau - Traitement d'étanchéité

4 - Conclusions - Commentaires

°
° °

Figure 1 : Le site : ouvrage, géologie, sources naturelles, 1 : 5 000

Figure 2 : Coupe lithologique, piézométrie, 1 : 500

Figure 3 : Fracturation rive droite

Figure 4 : Mise en eau, 1 : 5 000

Figure 5 : Voile d'étanchéité, 1 : 5 000

°
° °

Bibliographie :

- Lugeon, 1933, Barrages et géologie, Dunod, p. 119 à 127.
- Documents : François cementation Co L.T.D., 1931, plans du voile et des fuites, 1 : 2 000
- Levers géologiques originaux, Electricité de France, Direction de l'Equipement, Service Géologie

RESUME

Le barrage poids de CAMARASA (hauteur 92 m.) est situé en ESPAGNE sur la NOGUERA PALLARESA, affluent du SEGRE.

Il barre une gorge creusée dans une puissante série de calcaires dolomitiques qui présentent un faible pendage amont (17° environ). Ces formations karstiques reposent sur des marnes et des calcaires marneux étanches situés 200 m. environ sous l'ouvrage. Les failles sont rares, mais de grandes cassures verticales orientées amont-aval découpent le massif rocheux.

Le karst est représenté par des poches de sable dolomitique, quelques conduits de joints impénétrables et par des fissures verticales élargies par dissolution puis remplies d'argile et de blocs. Aucune cavité pénétrable ne peut être signalée. L'intensité de la karstification a été illustrée lors des travaux d'étanchéité par les quantités de produits secs injectés (3 t. par mètre linéaire de forage) et par les vitesses des circulations souterraines (300 à 750 m/h). Avant tous travaux, de nombreuses sources existaient sur les deux rives du SEGRE, à l'amont et à l'aval du confluent.

Dès la fermeture de la dérivation provisoire, des venues d'eau importantes sont apparues à l'aval immédiat de l'ouvrage. Les fuites devaient augmenter avec la mise en eau et atteindre 12 m³/s. Elles se développaient alors sur un front de 1200 m. Dans la retenue, l'infiltration se faisait par des points multiples et il y avait interconnection des cheminements souterrains.

Un voile de 1100 m. de développement descendant jusqu'aux marnes a été réalisé entre 1927 et 1931. Il fallut injecter plus de 190.000 t. de produits secs pour réduire les fuites de 80 %.

SUMMARY

The 92 metres high CAMARASA gravity dam in SPAIN lies on the NOGUERA PALLARESA, a tributary of the SEGRE.

It is built across a gorge through a thick series of dolomitic limestones with a shallow dip upstream of about 17°. These are karstic formations overlying impervious marls and marlaceous limestones about 200 m under the dam. There are few faults but the rock mass is cut up into compartments by large vertical cracks running parallel to the river.

Karst forms include pockets of dolomitic sand, a few joint small channels and vertical cracks widened out by solution and then filled with clay and boulders. There is no cavity large enough for a man to enter. The intensity of the karstification was illustrated when the grouting works were being carried out, by the large quantities of materials injected (3 tons dry weight per linear metre of drill hole) and the high velocity of the subsurface flow (300 to 750 m/hour). Before remedial work was done, there were many springs on both banks of the SEGRE upstream and downstream of the point of confluence.

As soon as the diversion works were closed, heavy leakage appeared immediately downstream of the dam, which increased as the upstream water level rose, to a peak of 12 m³/s, when it covered a front 1200 m long. Water escaped at many points in the reservoir floor through interconnected underground seepage paths.

A grout curtain 1100 m long penetrating down to the marls was realised between 1927 and 1931. More than 190,000 tons dry weight had to be injected but leakage was cut by 80 per cent.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Avec 92 m de haut, le barrage de CAMARASA était au moment de sa construction le plus haut barrage d'Europe.

En 1920, la mise en eau partielle de la retenue s'accompagna de pertes supérieures à 10 m3/s (1). Les travaux d'étanchement qui s'échelonnèrent sur plusieurs années et qui permirent de réduire les fuites de plus de 80 % doivent être cités parmi les premiers grands travaux d'étanchement réalisés sur une retenue artificielle en pays karstique.

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

Le barrage de CAMARASA est situé sur la Noguera Pallaresa, à moins de 400 m de son confluent avec le Segré, dont elle est un des affluents rive gauche.

En raison de la morphologie des deux vallées et de la position de l'ouvrage par rapport au confluent, les lignes de fuites sont particulièrement courtes.

Par ailleurs, ces deux vallées sont creusées dans la même unité de calcaires dolomitiques karstifiés ; enfin, aucune formation étanche ne limite les zones de circulations possibles.

L'étanchéité de la cuvette, à proximité de l'ouvrage, impliquait donc l'imperméabilité naturelle ou artificielle des dolomies.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage poids en béton
Volume : 218.000 m3
Hauteur : 92 m
Cote de la crête du barrage : 377
Longueur amont-aval de la retenue : 20 km
Capacité de la retenue : 157 x 10^6 m3

(1) *L'ouvrage a été terminé en 1922.*

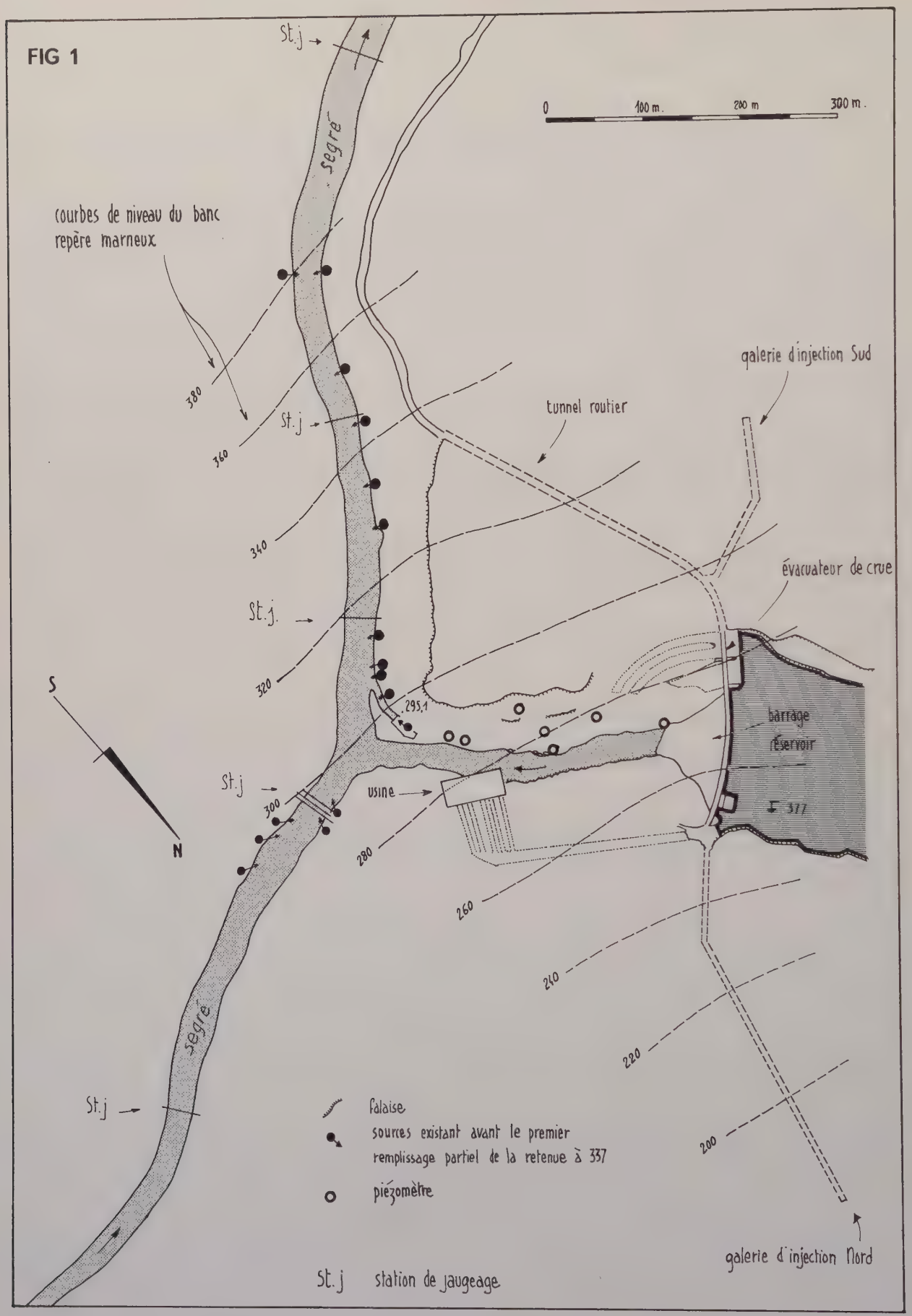


FIG 1
St.j
Ségré
0
100 m.
200 m
300 m.
courbes de niveau du banc repère marneux
380
360
340
320
300
280
260
240
220
200
St.j
St.j.
St.j
St.j
galerie d'injection Sud
tunnel routier
évacuateur de crue
barrage
réservoir
377
usine
295,1
S
N
falaise
sources existant avant le premier remplissage partiel de la retenue à 337
piézomètre
St.j station de jaugeage
galerie d'injection Nord

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE (fig. 1)

Dans la zone de leur confluent, le Segré et son affluent la Noguera Pallaresa, ont creusé leur vallée dans une même unité tabulaire de calcaires dolomitiques. Ce fait explique la morphologie très semblable des deux vallées. Ce sont des canyons ; le Segré et la Noguera Pallaresa coulent l'une et l'autre au fond de gorges limitées par des falaises verticales qui peuvent atteindre 100 m de haut.

Entre l'ouvrage et le confluent, la vallée de la Noguera Pallaresa ne dépasse pas 80 m de large. A l'amont de l'ouvrage, par contre, bien que toujours creusée dans les dolomies, la vallée s'élargit ; ce caractère explique pour une part le choix du site.

A la hauteur du confluent, la vallée du Segré, rivière plus importante, atteint 100 m de large. Le trait morphologique le plus remarquable reste cependant l'intersection en angle droit des deux vallées (fig. 1). Il résulte de cette configuration que la longueur des lignes de fuites est sensiblement la même rive droite et rive gauche, et que, dans les deux cas, les lignes de fuites sont particulièrement courtes.

2.2. GEOLOGIE

La géologie du site est simple. La gorge est creusée dans des calcaires dolomitiques d'âge jurassique moyen, appartenant à une série isoclinale qui plonge modérément (17°) vers l'amont.

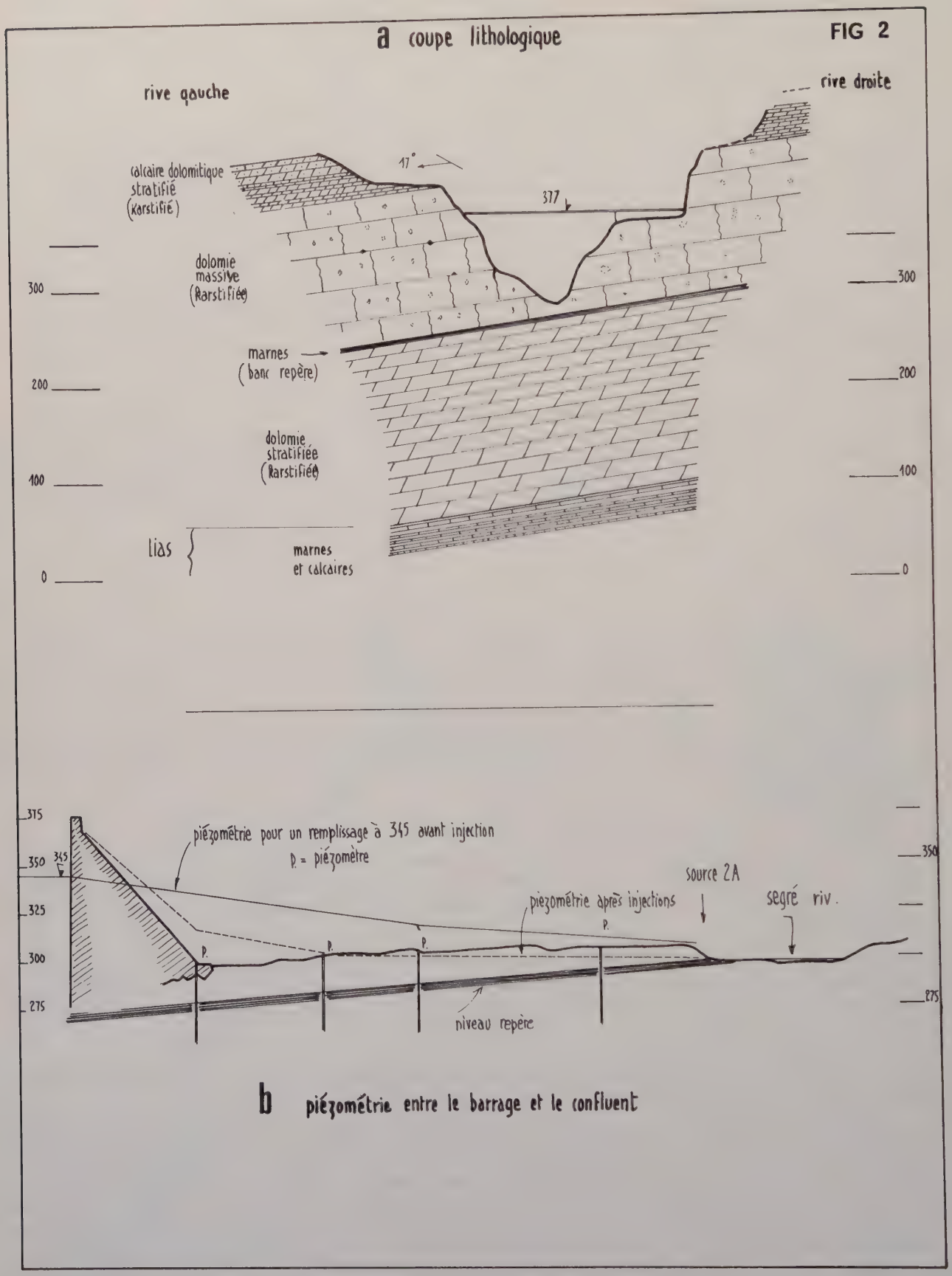
La coupe (fig. 2) présente les principaux faciès de cette série. En raison de la régularité des couches, cette coupe est valable dans toute la zone intéressée par le problème des fuites.

Cette série comprend :

- à la base, les calcaires marneux et les marnes du Lias qui ne sont connus dans la zone du barrage que par sondages. Ces formations sont considérées comme non karstiques ; elles serviront de plancher étanche pour arrêter en profondeur le rideau d'injection.
- au-dessus, sur plus de 300 m, se développe la puissante série des calcaires dolomitiques et des dolomies, sur laquelle l'ouvrage prend appui et qui devra être traitée par injection. Cette série, dans toute sa masse, est profondément karstifiée.

Compte tenu des observations lithologiques et du bilan des travaux d'injection, cette série doit être divisée en deux unités :

- à la base, une série dolomitique de 150 m de puissance, stratifiée en couches bien individualisées. Cette formation est limitée au toit par un banc repère de marnes de 5 à 6 m d'épaisseur. Elle n'affleure pas dans la vallée de la Noguera. Par contre, elle est visible rive droite dans la vallée du Segré à l'aval du confluent. Bien connue par sondage, elle s'est révélée particulièrement perméable (voir plan fig. 5). A l'injection, les absorptions de coulis y ont été particulièrement élevées.


a coupe lithologique
FIG 2
rive gauche
rive droite
calcaire dolomitique stratifié (karstifié)
dolomie massive (karstifiée)
marnes (banc repère)
dolomie stratifiée (karstifiée)
lias
marnes et calcaires
17°
377
300
200
100
0
piézométrie pour un remplissage à 345 avant injection
P. = piézomètre
345
350
325
300
275
source 2A
piezométrie après injections
segré riv.
niveau repère
b piézométrie entre le barrage et le confluent

- au-dessus du niveau repère marneux, se développe une nouvelle série dolomitique de plus de 120 m de puissance.
  Cette série a été recoupée entièrement par le tunnel routier et la galerie d'injection rive gauche (fig. 3).
  Dans sa partie basse (visible dans le tunnel routier), elle est constituée par des dolomies massives. Dans sa partie haute (galerie rive gauche), les couches s'individualisent. Les joints d'interstrates sont soulignés par des niveaux marneux de couleur sombre contenant des matières organiques (type lignites).

Ce changement lithologique est bien visible dans le paysage. La falaise dolomitique prend fin au sommet des dolomies massives. Le talus qui lui fait suite correspond aux formations litées.

En raison du pendage peu accentué de cette série dolomitique de plus de 300 m de puissance, ces formations se développent largement dans la cuvette dont elles constituent les versants sur plusieurs km à l'amont de l'ouvrage. La surface dolomitique mouillée par les eaux de la retenue a été évaluée à plus de 500.000 m2.

- Structure et fracturation

Les nombreux sondages et les observations de surface ont permis de dessiner en courbes de niveau la base du banc marneux repère (fig. 1). Cette carte illustre la régularité de la structure et le pendage nord des formations. Cette régularité de la structure est confirmée par les observations en galeries. Localement, cependant, les couches sont affectées par des déformations souples d'importance secondaire (fig. 3).

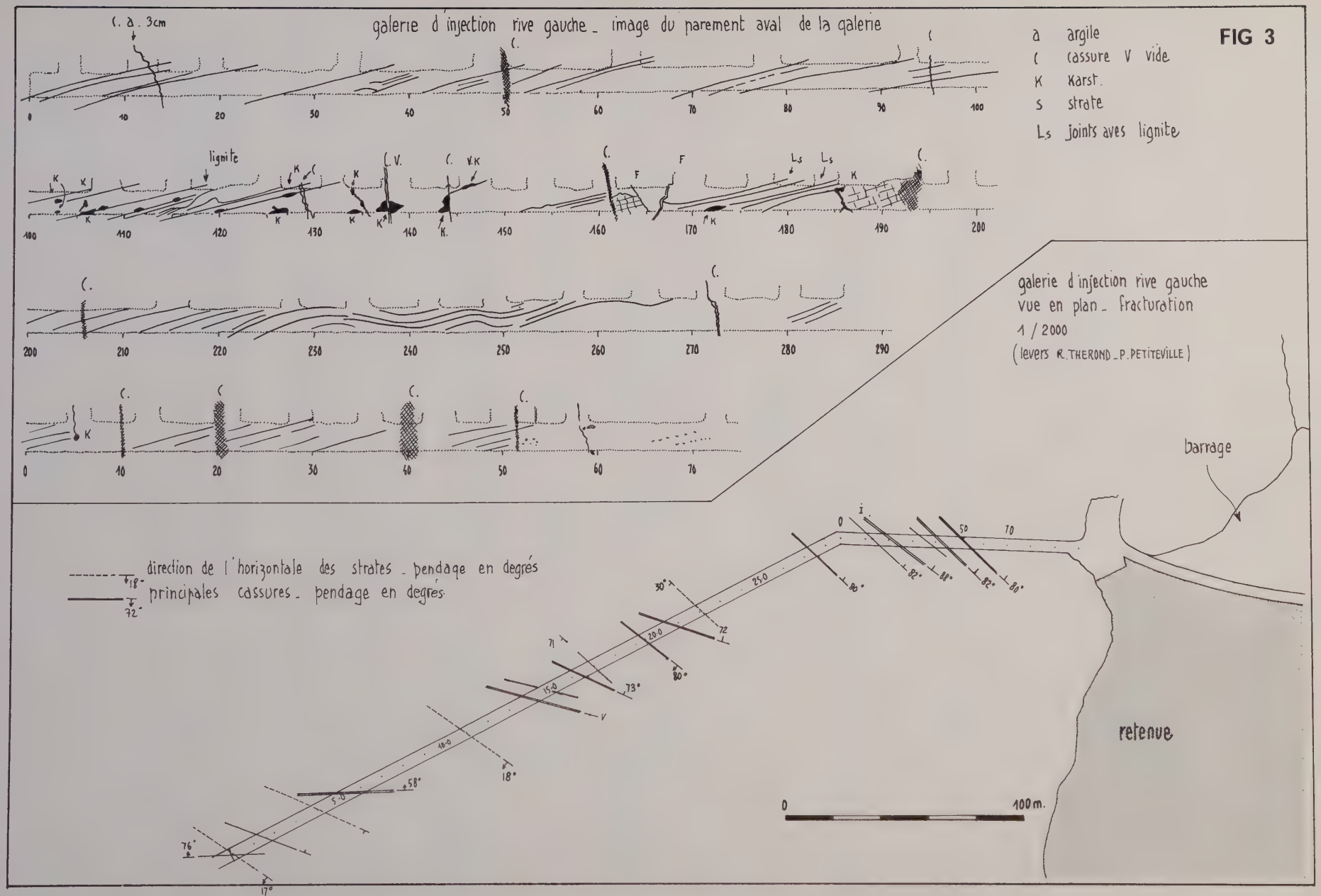
Une seule faille a été mise en évidence par sondage (rive gauche) (fig. 5). Son rejet dépasserait 50 m.

La fracturation est caractérisée par l'existence d'un réseau très net de grandes cassures verticales, visibles sur les falaises des gorges à l'aval et à l'amont de l'ouvrage et également dans les galeries d'injection et dans le tunnel routier.

Le lever géologique (fig. 3) montre la fréquence et l'orientation de ce réseau sur la rive gauche.

Rive droite, dans le tunnel routier, 24 accidents principaux ont été relevés pour 400 m de galerie, soit un écartement moyen de 16 m entre deux accidents.

La plupart de ces accidents sont des cassures sans rejet, élargies par dissolution ; ils sont le plus souvent remplis par un matériel argilo-détritique. Certains d'entre eux sont cependant vides (observations en galerie) et jouent de toute évidence un rôle dans le drainage souterrain des eaux.


galerie d'injection rive gauche _ image du parement aval de la galerie
C. à 3cm
lignite
a argile
C cassure V vide
K karst
S strate
Ls joints aves lignite
FIG 3
galerie d'injection rive gauche
vue en plan _ fracturation
1 / 2000
(levers R.THEROND _ P.PETITEVILLE)
barrage
retenue
direction de l'horizontale des strates _ pendage en degrés
principales cassures _ pendage en degrés
0
100 m.

2.3. LA KARSTIFICATION

Elle présente les caractères typiques du karst des roches dolomitiques.

Les vides sont rares, les épontes des cavités restent souvent imprécises.

Le karst est représenté par des poches de sables dolomitiques, par des petits conduits de joints et également par des fissures élargies. Les poches de sables dolomitiques (résultats de la dissolution de la trame calcaire de la roche) sont de taille variable. Elles sont particulièrement nombreuses dans les séries massives (tunnel routier). Dans les zones plus stratifiées, les conduits de joints apparaissent ; ils sont en général de petite taille.

Les fissures verticales peuvent atteindre un mètre de large. Les remplissages (argile rouge et débris rocheux) sont toujours importants. Aucune cavité pénétrable n'a pu être vue ou n'a été signalée (1).

Les travaux et les essais ont également fourni des renseignements (indirects) sur le karst.

L'importance desquantités de produits injectés (3 t au mètre de forage), la granulométrie des matériaux qu'il a été possible d'injecter (scories, gravier), la vitesse des circulations entre les sondages et les sources (360 à 740 m/h (2)) et l'interdépendance de ces dernières montrent bien l'importance et le degré de la karstification de ces séries dolomitiques.

Remarque : Les absorptions les plus fortes sont localisées dans la partie basse au-dessous du niveau repère.

Enfin, les colorations effectuées dans la retenue ont également montré que les points d'absorption étaient multiples.

2.4. HYDROGEOLOGIE

Avant tous travaux, des sources existaient à l'aval du site sur la rive droite du Segré (fig. 1).

En plus des sources pérennes, des sources intermittentes apparaissaient pendant les périodes de crue de la Noguera Pallaresa. Les eaux de ces sources avaient pour la plupart des caractéristiques d'eau thermale. Ces sources ont été interprétées comme la manifestation de circulations profondes, s'effectuant au contact du Lias étanche et du Jurassique. La température de ces eaux à l'origine anormalement chaudes, devait varier par la suite au moment du remplissage (refroidissement).

(1) *Au cours de la visite effectuée sur le chantier.*

(2) *Ces vitesses sont des vitesses artificielles (le gradient est provoqué par l'injection). Elles restent cependant caractéristiques d'un matériau très karstifié.*

3 - MISE EN EAU - TRAITEMENT D'ETANCHEMENT

● Avant la mise en eau, à la fermeture de la dérivation provisoire, on note d'importantes venues d'eau à l'aval.

● Mise en eau

La mise en eau a débuté au printemps 1920.

1) Pendant le remplissage partiel de la retenue et jusqu'à ce que le plan d'eau atteigne la cote 337, une série d'émergences apparaît, notamment à proximité de l'ouvrage.

2) Durant le remplissage de la tranche 337-341 (du 11 avril au 16 avril 1920), une nouvelle série d'émergences apparaît rive droite.

3) Enfin, durant le remplissage de la tranche 350 à 364 (8 mai à 17 mai 1920), une nouvelle série de sources apparaît.

● Au total (fig. 4)

- Les "sources" se développent sur un front de 1200 m, à l'aval et à l'amont du confluent. La plus importante, la source (A2), a un débit voisin de 3000 l/s.
- Les sources se localisent pour la plupart en partie basse.
- Les sources "thermales" se refroidissent par apports d'eau de la retenue.
- La piézométrie mesurée par une série de sondages piézomètres met en évidence un écoulement en charge, sous toute la rive entre le barrage et le Segré. On peut faire l'hypothèse que la couche-repère joue en partie un rôle de tapis étanche, favorisant ainsi le phénomène de mise en pression (fig. 2b).
- Le débit total des fuites atteint alors près de 12 m3/s.
- Entre les années 1920-1927, ce débit va augmenter de près de 5 % par an.

● Etude complémentaire

En 1924, une étude géologique et surtout hydrogéologique est entreprise (1).

Cette étude devait préciser les deux faits suivants :

- les points d'absorption dans la retenue sont multiples et localisés à des cotes variables ;

(1) *Cette étude a été réalisée sous l'autorité du Professeur Lugeon.*

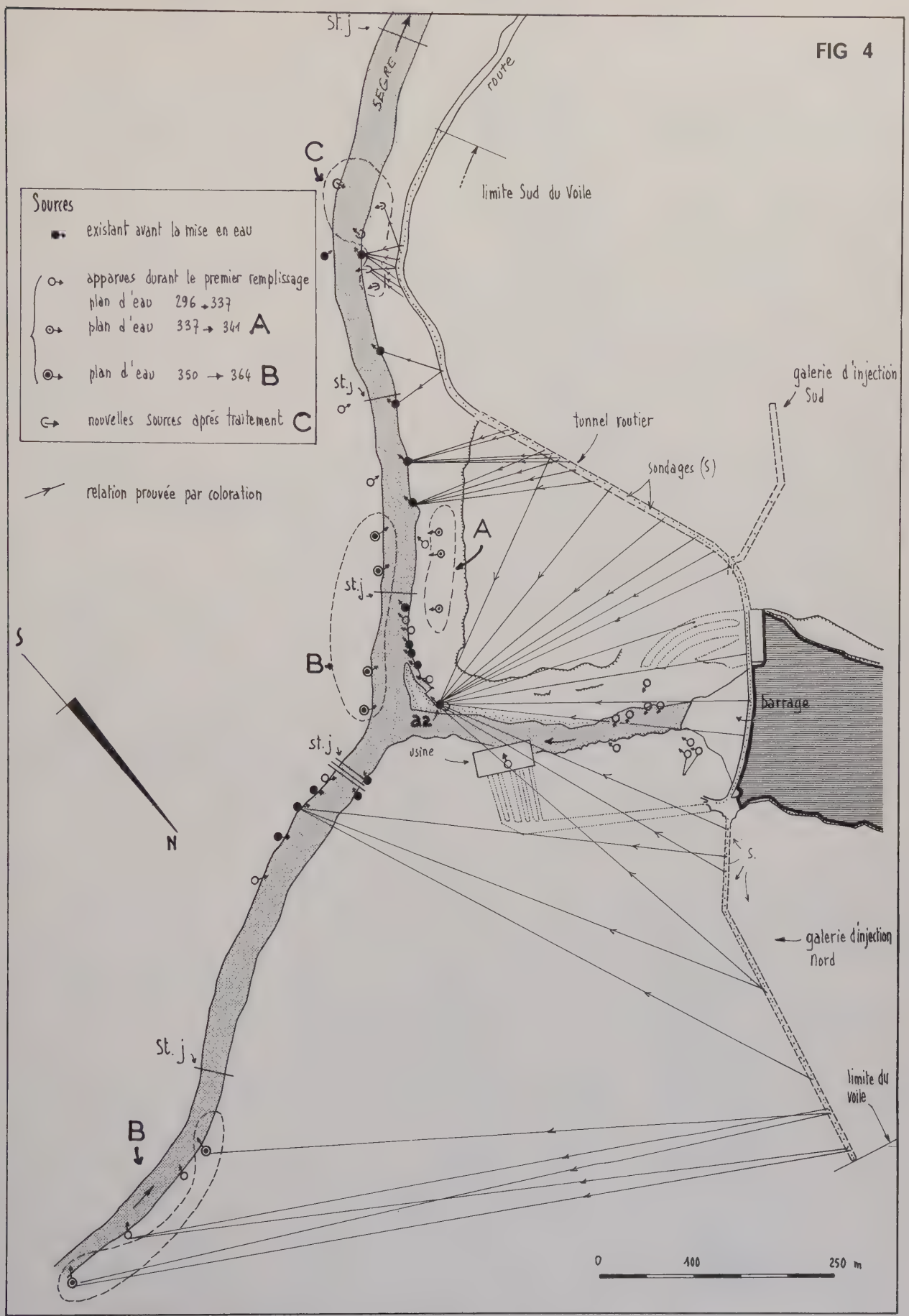


FIG 4
Sources
existant avant la mise en eau
apparues durant le premier remplissage
plan d'eau 296 → 337
plan d'eau 337 → 341 A
plan d'eau 350 → 364 B
nouvelles sources après traitement C
relation prouvée par coloration
St.j
SEGRE
route
limite Sud du Voile
C
A
B
st.j
galerie d'injection Sud
tunnel routier
sondages (S)
barrage
usine
a2
S
N
galerie d'injection Nord
limite du voile
0
100
250 m

- l'interdépendance des résurgences ne permet pas d'espérer qu'une perte puisse être traitée isolément ; lors d'un tel traitement, en effet, le débit des sources voisines augmente.

● Reprise des travaux

Compte tenu du résultat des études, les travaux d'étanchement ont été repris en 1927.

Entre 1927 et 1931, un rideau d'injection traitant les dolomies jusqu'au Lias est réalisé dans le but de ramener les fuites à un débit acceptable.

A la fin des travaux, les caractéristiques du voile sont les suivantes (fig. 5) :

- développement (rive droite, rive gauche) : 1100 m environ ; rive droite, on remarque (fig. 4) l'utilisation pour des raisons économiques, du tunnel routier comme galerie d'injection et l'abandon simultané de la galerie d'injection Sud ;
- principe : sondages verticaux en 1 ligne, écartement moyen 6 m ;
- profondeur des forages : 112 m à 350 m ;
- surface de l'écran réalisé : 288.000 m2 ;
- longueur de sondage foré : 52.000 m ;
- quantité de matériau injecté : 190.000 t ;
- poids de matériau injecté au m2 de voile : 650 kg.

● Résultats des travaux d'injection

Les absorptions maximales se font dans les dolomies stratifiées, comprises entre le Lias et le niveau-repère. Par ce traitement, les fuites sont réduites en 3 ans de 80 %. Les sous-pressions, à l'aval de l'ouvrage, sont fortement diminuées (fig. 2b).

4 - COMMENTAIRES - CONCLUSIONS

Il faut noter la nature dolomitique de la roche, la multiplicité des fuites, qui mettent en évidence l'imprégnation générale des dolomies et également la piézométrie "artésienne" à l'aval de l'ouvrage après la mise en eau.

L'efficacité du traitement a été remarquable bien que l'espacement des sondages puisse paraître élevé par rapport aux normes actuelles.

o
o o

FIG 5

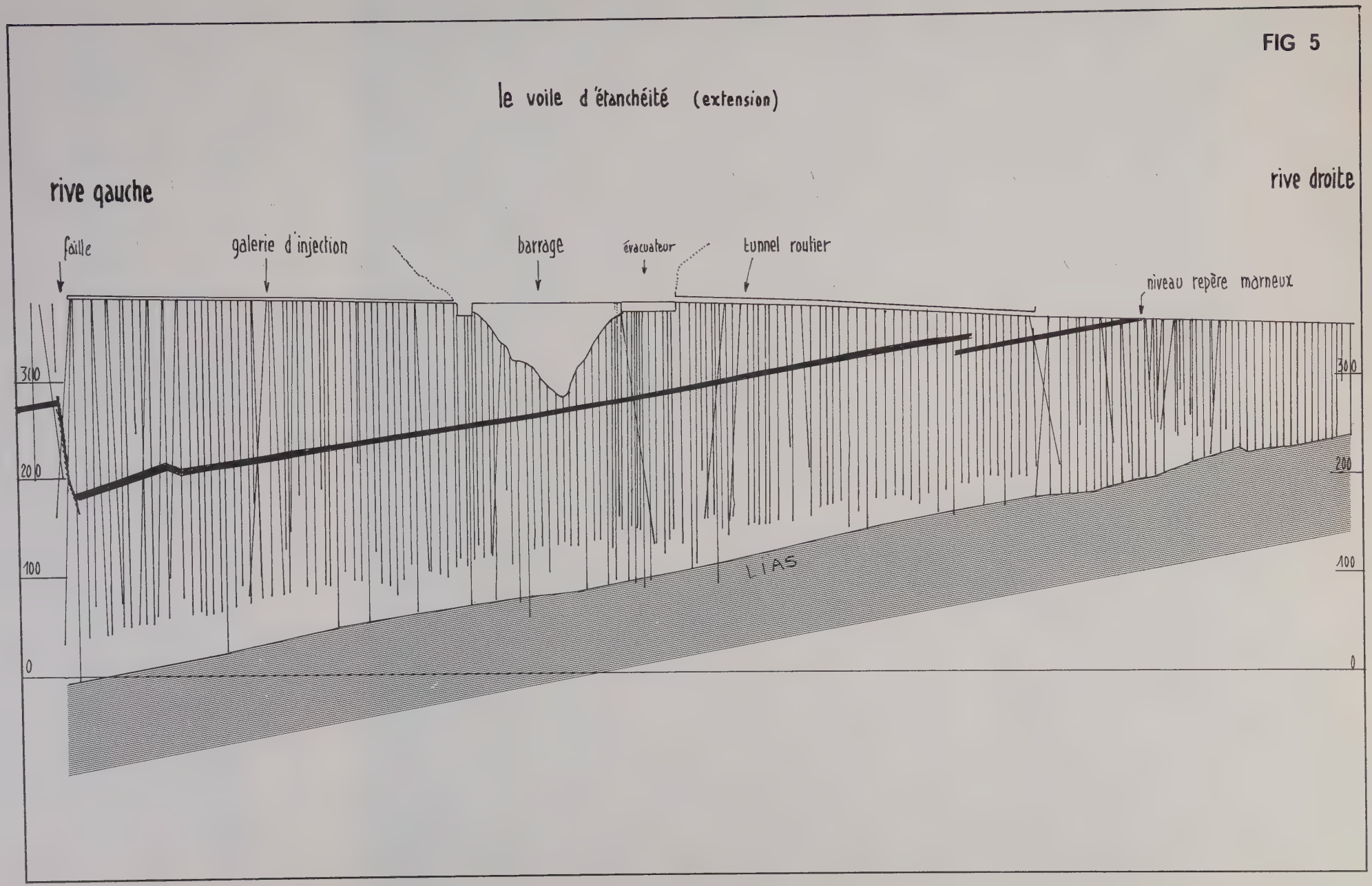

le voile d'étanchéité (extension)
rive qauche
rive droite
faille
galerie d'injection
barrage
évacuateur
tunnel routier
niveau repère marneux
300
200
100
0
LIAS

Photo R. THERO

LE BARRAGE DE BOUVANTE
Vue générale depuis l'amont en période de basses eaux

On distingue les falaises urgoniennes (U) rive droite et rive gauche qui marquent l'entrée des gorges de la Lyonne et constituent les appuis du barrage (bien visibles rive gauche).
En amont de l'Urgonien :

1 : les marnes de l'Hauterivien qui constituent la rive droite du torrent des Ollats
2 : l'Hauterivien marno-calcaire perméable protégé en partie par le tapis.

Travaux :

3 : dalle en béton exécutée en 1958
4 : dalles et gunite (1935-1937-1949)
5 : excavation avec mur de béton (1930-1934)
6 : évacuateur complémentaire (1962-1964).

CHAPITRE

3

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Bouvante

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème de l'étanchéité
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel

3 - Mise en eau - Bilan - Travaux complémentaires

4 - Conclusions - Commentaires

°
° °

Figure 1 : Carte géologique simplifiée au 1 : 50 000

Figure 2 : Carte hydrogéologique au 1 : 25 000

Figure 3 : Coupes tectoniques

Figure 4 : Coupes lithologiques - Travaux - Débits de fuites

(Le fond topographique des cartes, fig. 1 et 2, a été dessiné d'après les cartes IGN : Charpey 1 : 50 000 et Charpey n° 3/4 1 : 25 000)

Photo : L'ouvrage vu de l'amont

°
° °

Bibliographie :

- ANDRE, AUDINET, ROY, 1968 : Les fuites du lac de BOUVANTE. Colloque sur l'hydrogéologie du massif du Vercors. Travaux du Laboratoire de Géologie de Grenoble, mémoire n° 8.
- LE PAGE, 1964 : Etude géologique et hydrogéologique des abords du barrage de BOUVANTE LE HAUT (rapport inédit).
- BARBIER, 1963 : Barrage de BOUVANTE, rapport sur les nouvelles études géologiques et piézométriques (inédit).

RESUME

Le barrage poids de BOUVANTE (hauteur 38 m.) est situé sur la LYONNE au coeur du massif montagneux de VERCORS (ALPES FRANCAISES DU NORD).

Il est construit à l'entrée d'une gorge calcaire (URGONIEN). La retenue se développe en grande partie sur des terrains étanches; à proximité de l'ouvrage, les calcaires urgoniens et crétacés sont cependant mouillés par les eaux de la retenue. La tectonique est complexe et la fracturation importante; des failles à fort rejet mettent en contact des formations calcaires séparées, à l'origine, par des formations étanches.

La karstification des calcaires de l'URGONIEN est considérable et spectaculaire; cette région contient quelques uns des plus grands réseaux karstiques européens.

La LYONNE est une rivière de montagne dont la pente dépasse 30°/oo; elle est alimentée en grande partie par des sources karstiques. Dans les gorges de l'URGONIEN, il est vraisemblable que la LYONNE perd en partie ses eaux au profit des écoulements souterrains. A l'aval du barrage, la principale source karstique qui sort des calcaires urgoniens est la source des FREYDIERES située 300 m plus bas, à 6 km. de distance.

A la mise en eau, en 1926, les fuites ont été évaluées à 1100 l/s; les eaux infiltrées dans les calcaires urgoniens et crétacés rejoignaient la source des FREYDIERES. Entre 1927 et 1958, de nombreux traitements (tapis, injections...) ont permis de réduire les fuites à moins de 300 l/s.

SUMMARY

BOUVANTE gravity dam is 38 m high on the LYONNE in the heart of the VERCORS mountains in the northern French Alps.

It is built at the entrance of a limestone gorge (URGONIEN). A major part of the reservoir covers impervious ground but close to the dam the Urgonien and Cretaceous limestones are in contact with the water. The tectonics are complex and there is major fracturation; large throw faults bring limestone formations that were originally separated by impervious formations into contact with each other.

There is considerable spectacular karstification of the URGONIEN limestones. The area contains one of Europe's largest karst systems.

The LYONNE is a mountain stream with a slope greater than 30 °/oo fed mainly from karst springs. In the gorges in the URGONIEN, the LYONNE probably loses part of this water to underground flow. The main karst spring downstream of the dam emerging from the Urgonien limestones is FREYDIERES spring 300 m lower down, 6 km from the dam.

When the reservoir was filled in 1926, leakage was estimated at 1100 litres/s. The water infiltrated into the Urgonien and Cretaceous limestones and emerged at FREYDIERES spring. Leakage was cut down to less than 300 litres/s between 1927 and 1958 with an impervious blanket, grouting, etc.

1 - GENERALITES

• INTRODUCTION

Etudié dès 1918 (1), mis en service en 1925, le barrage de BOUVANTE est l'un des plus anciens barrages français construits en pays calcaire. Situé au coeur du Vercors sur la Lyonne, dans une région célèbre pour son karst et ses grottes, le barrage de BOUVANTE est le seul ouvrage de retenue réalisé dans cette région, il présente donc un intérêt exceptionnel.

• CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage poids en béton
Hauteur : 38 m
Longueur en crête : 34 m
Cote maximale d'exploitation du plan d'eau : 574 m (à l'origine la cote d'exploitation prévue était de 582,70)
Réserve utile : 1,3 x 10^6 m3
Apport annuel moyen : 37 x 10^6 m3
Débit moyen : 1,27 m3/s
Bassin versant topographique : 33,6 km2

• PROBLEME DE L'ETANCHEITE

L'ouvrage est construit à l'entrée d'une gorge creusée dans la puissante série des calcaires karstiques de l'Urgonien. La retenue se développe en grande partie dans les formations marneuses et marno-calcaires du Crétacé inférieur. Cependant, à proximité de l'ouvrage, les eaux de la retenue mouillent les calcaires urgoniens. La continuité de ces formations calcaires vers l'aval où elles se développent à une cote inférieure à celle de la retenue, représentait donc une possibilité de fuite non négligeable.

• LA KARSTIFICATION REGIONALE

L'Urgonien (faciès calcaire du Crétacé supérieur) dont la puissance dépasse 300 m, est la principale formation karstique de la région. Les indices karstiques sont omniprésents dans le Vercors (grottes, avens, pertes, résurgences) et souvent spectaculaires.

Le gouffre BERGER, situé à 40 km à vol d'oiseau de BOUVANTE, est, avec 1122 m de profondeur, le réseau le plus profond du monde S'il est évidemment la cavité la plus célèbre du massif, son réseau d'alimentation n'est pourtant pas, et de loin, le plus important du Vercors. Par exemple, sur le bassin versant de la Vernaison, affluent de la Bourne parallèle à la Lyonne, dont la superficie dépasse 280 km2, 80 % des précipitations (valeur moyenne : 1350 mm/an) s'infiltrent immédiatement et sont drainées vers le réseau souterrain de la Luire qui ramène ces eaux directement à la Bourne. * Il a été dépassé depuis par la Pierre St Martin - 1150 m de profondeur.*

(1) *Société des forces motrices du Vercors.*

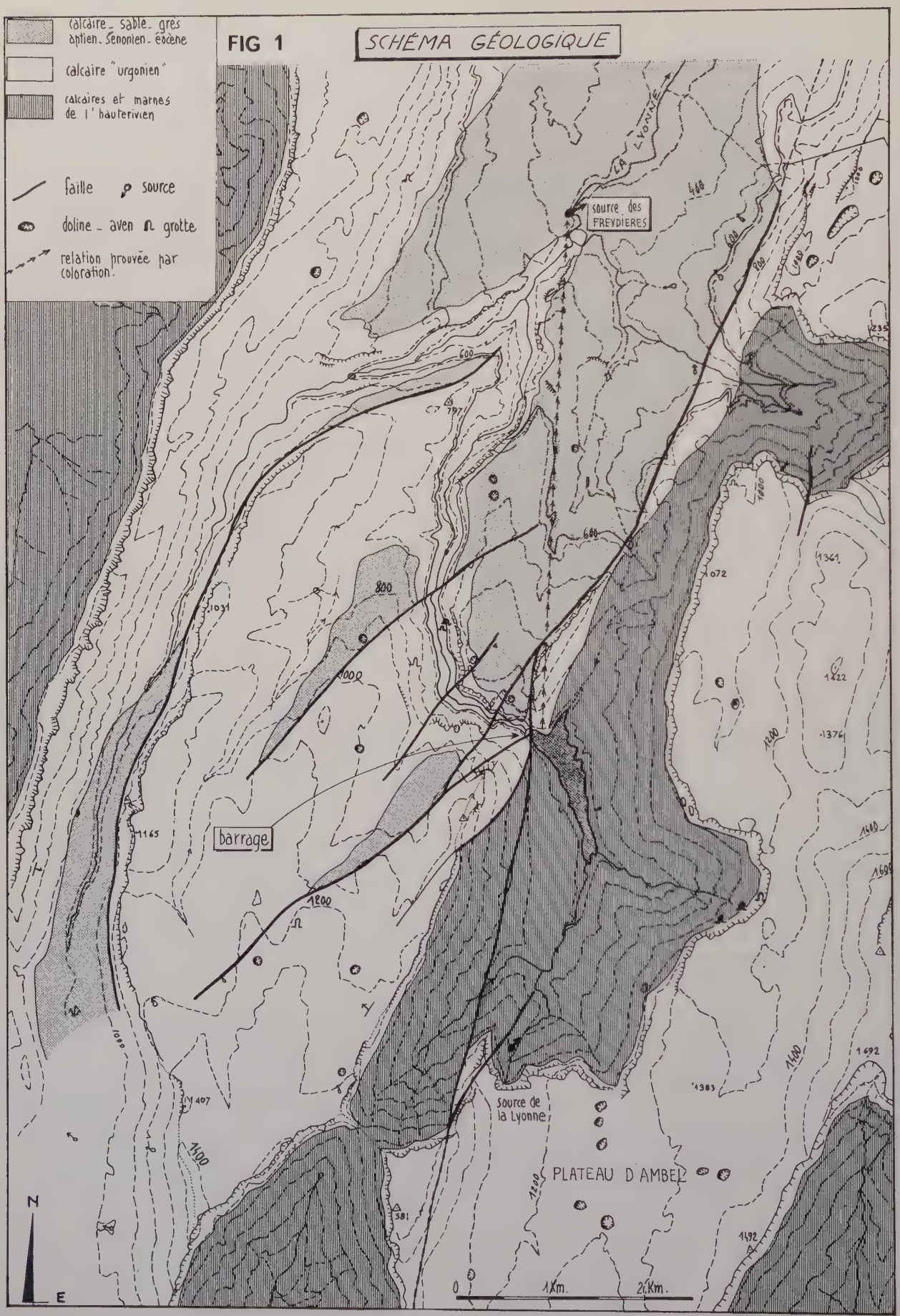


FIG 1
SCHÉMA GÉOLOGIQUE
calcaire_sable_grès aptien_Senonien_éocène
calcaire "urgonien"
calcaires et marnes de l'hauterivien
faille
source
doline_aven
grotte
relation prouvée par coloration
LA LYONNE
source des FREYDIERES
barrage
Source de la Lyonne
PLATEAU D'AMBEL
N
E
0
1 Km.
2 Km.

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE

La carte au 1 : 50 000 (fig. 1) met clairement en évidence les traits morphologiques de la zone où se situent le barrage et la retenue de BOUVANTE.

Cette région est caractérisée par un relief rigoureux, profondément marqué par l'érosion glaciaire quaternaire.

Les plateaux qui culminent vers 1300-1600 m sont limités par les falaises urgoniennes qui peuvent dépasser 200 m de haut. Ces plateaux sont généralement séparés par des vallées larges et profondes, creusées dans les formations plus tendres, sous-jacentes aux calcaires. Lorsque les rivières n'ont pas complètement entaillé les séries calcaires, elles coulent dans de profonds canyons difficilement accessibles, qui, le plus souvent, ne sont pas des frontières hydrogéologiques.

Les cours d'eau principaux (fig. 1) ont une orientation générale Nord-Sud, parallèle aux grands accidents tectoniques qui séparent les différentes unités structurales. Par des décrochements en baïonnette, les rivières passent d'une unité structurale à une autre. La Lyonne à l'aval du barrage illustre ce trait morphologique.

2.2. GEOLOGIE

- Stratigraphie - Lithologie

La carte (fig. 2) montre que les formations mouillées par les eaux de la cuvette sont d'une part les marnes et les marno-calcaires hauteriviens, et d'autre part les calcaires hauteriviens, barrémiens et urgoniens. Par le jeu des failles et des pendages, les calcaires sénoniens (d'où jaillissent les sources des Freydières) peuvent cependant jouer un rôle en relayant vers l'aval les calcaires urgoniens, bien qu'ils ne soient pas en contact direct avec les eaux de la retenue.

La série stratigraphique qui intéresse le barrage de BOUVANTE va donc de l'Hauterivien au Sénonien. Bien que la région de BOUVANTE soit à la limite de deux provinces géologiques caractérisées par des variations rapides de faciès, la série lithologique, fig. 4a, peut cependant être considérée comme caractéristique de la zone couverte par la carte fig. 2.

- Perméabilité des formations : fig. 4. De bas en haut :

A la base, l'Hauterivien marneux, par sa puissance et par sa nature, est la formation la plus imperméable. Il joue un rôle d'écran.

Les calcaires et les marno-calcaires hauteriviens sont toujours suspects, plus particulièrement dans les zones tectonisées où les interbancs marneux sont laminés.

FIG 2

Bouvante

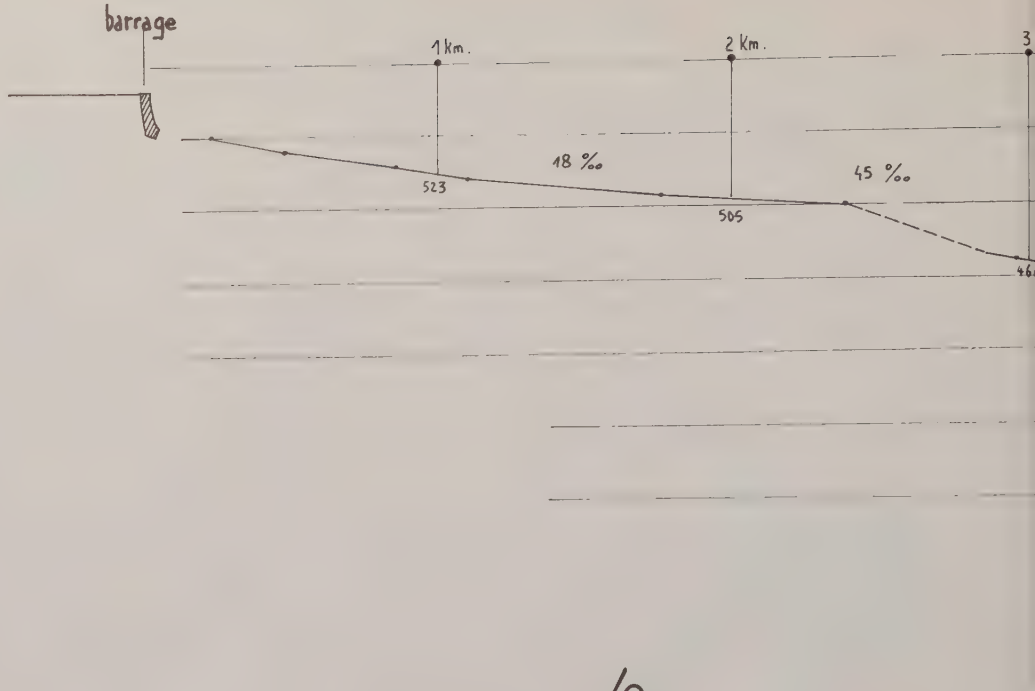


schéma géologique et hydrogéologique

falaise.

grotte.

aven - doline

calcaires - grés sableux - sables sénonien et miocène.

marnes et calcaires crétacé moyen.

calcaire urgonien barrémien sup. et aptien inférieur

marno-calcaires et calcaires hauterivien et barrémien

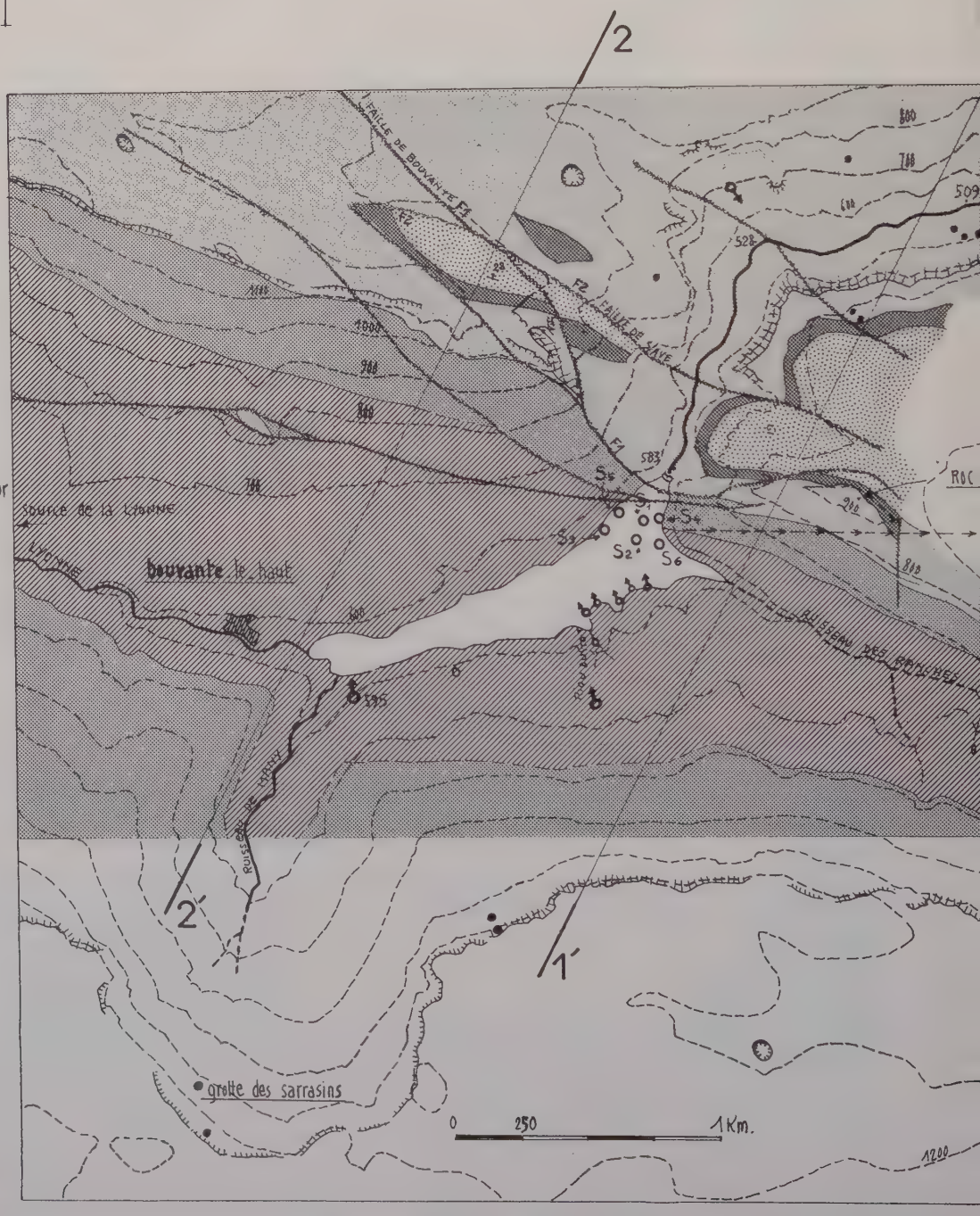
marnes - hauterivien.

faille

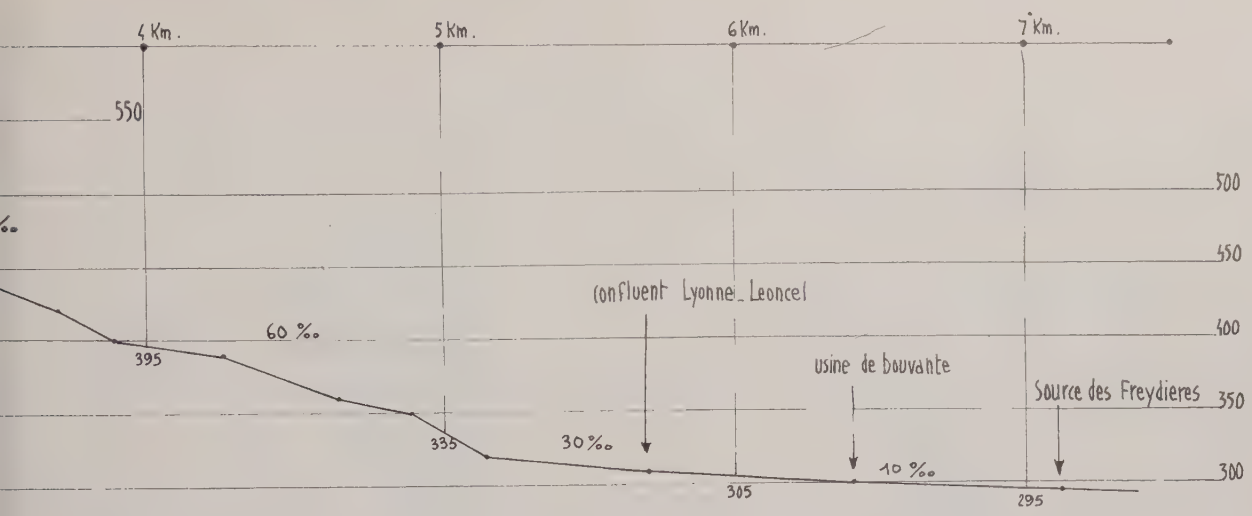
source

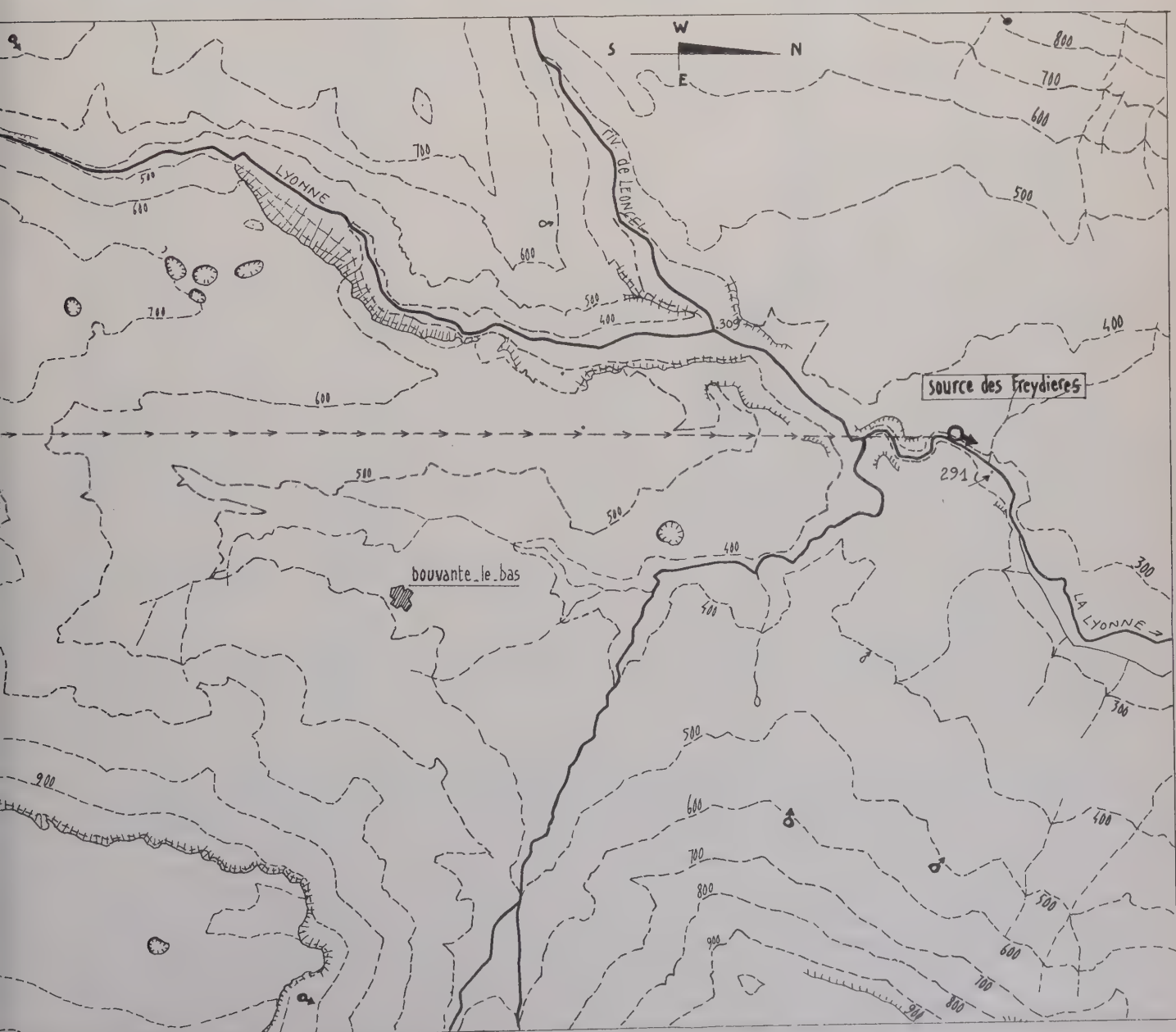
relation prouvée par coloration.

emplacement des coupes géologiques.



yonne entre le barrage et la Source des Freydières





Les calcaires du Barrémien inférieur sont karstiques (ex : grotte des Sarrasins).

Les calcaires de l'Urgonien sont (rappelons-le), la grande formation karstique du Vercors.

Le Crétacé moyen (marnes et calcaires) a une épaisseur trop faible pour jouer (sauf localement) le rôle d'écran.

Le Sénonien, par sa nature et l'importance de sa fissuration, est toujours très perméable.

- Autres formations :

Les formations quaternaires sont représentées par des éboulis anciens qui tapissent les versants de la cuvette. Ils sont généralement constitués par des éléments calcaires anguleux de petite taille (cryoclastie), cimentés par de l'argile. L'épaisseur de ces dépôts peut atteindre plusieurs mètres.

Les alluvions (sables, galets, argiles) qui recouvrent le bed-rock de la Lyonne ont une épaisseur de 3 à 15 m (sondages) ; elles sont en général imperméables.

Remarque : L'existence d'un surcreusement glaciaire peut être envisagée mais n'a pas été mise en évidence.

- Structure et fracturation

Les coupes 1 et 2, fig. 3 (localisation : fig. 2), illustrent la structure de l'unité de BOUVANTE.

La puissante série urgonienne qui constitue "l'ossature" du paysage, est découpée en unités inclinées vers l'Est. Ces unités sont séparées les unes des autres par des accidents complexes, orientés N-S.

Le barrage est situé sur la zone tectonisée qui limite à l'Ouest l'unité de la cuvette. Cet accident (coupe 1) peut être assimilé à une brutale retombée anticlinale, laminée et cisaillée par des accidents cassants. Ces accidents isolent en particulier une véritable écaille de calcaire urgonien qui marque l'entrée de la gorge. L'ensemble de l'unité chevauche légèrement l'anticlinal à coeur sénonien, qui se développe à l'Ouest du Roc de la Croix.

Ces accidents N-S abaissent régulièrement vers l'Ouest la série urgonienne.

Toute cette zone présente une fracturation intense, les accidents les mieux individualisés sont : la faille de SERVE et la faille de BOUVANTE. Cette dernière, orientée N-S, a un pendage amont voisin de 45°, elle se prolonge donc sous la retenue.

De part et d'autre de ces accidents principaux, les diaclases sont nombreuses ; elles affectent l'Urgonien, les calcaires du Barrémien et même, vers l'amont, les calcaires de l'Hauterivien qui sont baignés par la retenue. Les princi-

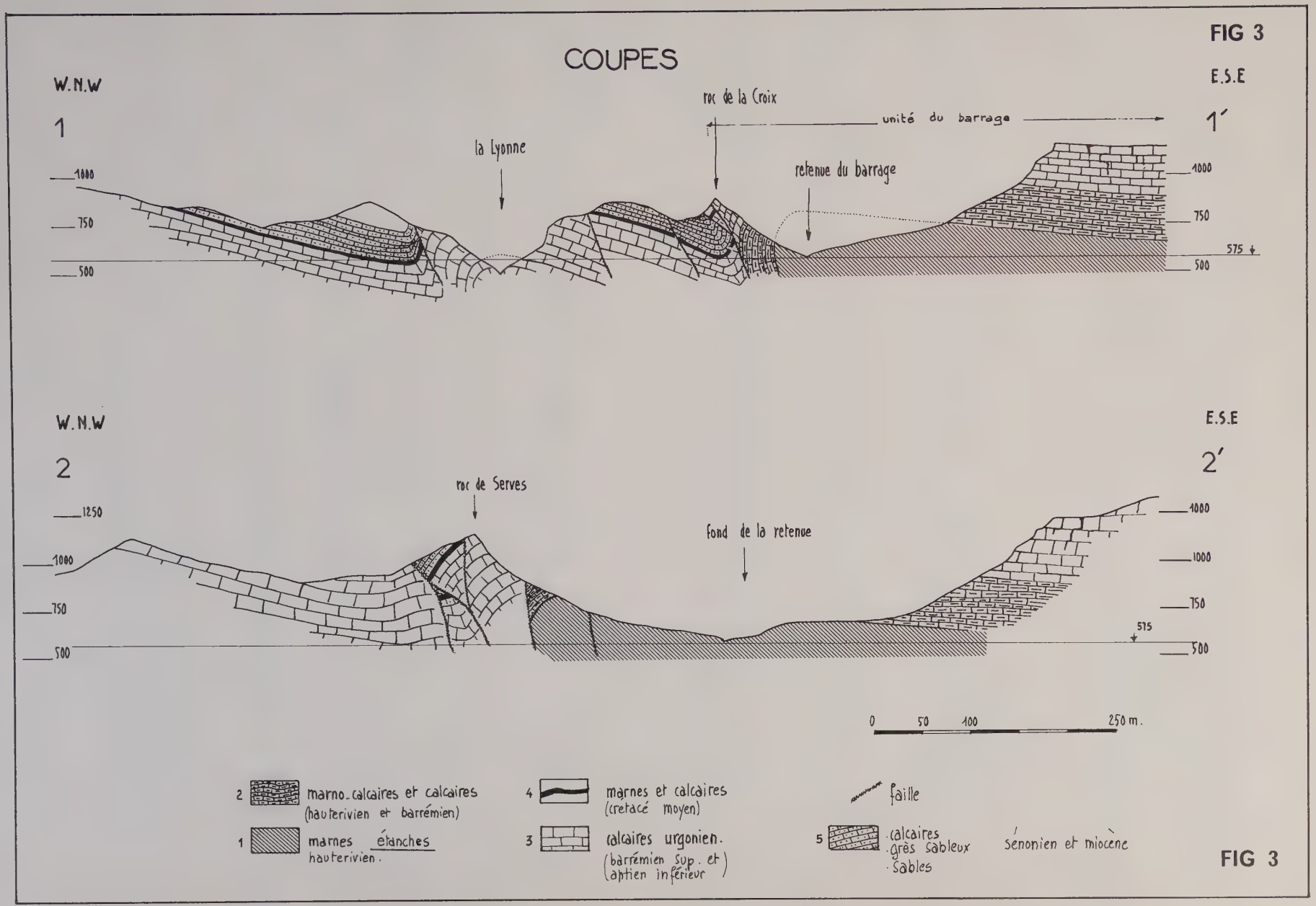


FIG 3
COUPES
W.N.W
1
E.S.E
1'
roc de la Croix
unité du barrage
la Lyonne
retenue du barrage
1000
750
500
575
W.N.W
2
E.S.E
2'
roc de Serves
fond de la retenue
1250
1000
750
500
575
0 50 100 250 m.
2 marno-calcaires et calcaires (hauterivien et barrémien)
1 marnes étanches hauterivien.
4 marnes et calcaires (crétacé moyen)
3 calcaires urgonien. (barrémien sup. et aptien inférieur)
faille
5 · calcaires · grès sableux · Sables sénonien et miocène
FIG 3

paux réseaux ont une direction N 30°E et N 10°E ; ils sont donc sensiblement transverses à la rivière et parallèles aux failles.

L'étude détaillée de la structure de cette zone tectonisée a, par ailleurs, montré que, à quelques centaines de mètres au Nord du barrage, les calcaires fissurés et perméables du Sénonien viennent par le jeu des failles relayer les calcaires urgoniens.

2.3. LA KARSTIFICATION

Les cartes, fig. 1 et 2, situent les nombreux indices karstiques (avens, grottes, sources, dolines) ; la plupart de ces indices est située dans les calcaires urgoniens, soit sur les plateaux, soit à la base des falaises (ex : source de la Lyonne).

Il existe cependant des indices dans les calcaires du Barrémien (ex : grotte de Sarrasins). De même la carte, fig. 1, montre que des dépressions karstiques existent également sur les plateaux sénoniens. Il faut remarquer d'ailleurs que la source des Freydières sort des calcaires sénoniens.

Sur le site du barrage (fig. 4), les travaux au rocher ont rencontré dans les galeries et dans les puits de nombreuses fissures karstiques en partie colmatées par de l'argile rouge. Ils ont également permis de déceler des vides karstiques pénétrables.

2.4. L'HYDROLOGIE ET L'HYDROGEOLOGIE

Le profil en long de la rivière, fig. 1, montre que la pente moyenne de la Lyonne dépasse 40 ‰ entre le barrage et les sources des Freydières. La pente est maximale dans la partie N-S du cours.

Remarque : Rappelons que l'étude statistique montre que la pente moyenne des écoulements souterrains karstiques stabilisés est de l'ordre de 5 à 6 ‰ (voir 1ère partie). Il est donc certain que, entre le site du barrage et la source des Freydières, la Lyonne ne constitue pas un niveau de base pour les circulations souterraines. Ce fait est confirmé par l'observation suivante : à la hauteur de l'ouvrage dans les calcaires urgoniens, les travaux au rocher réalisés sous le lit de la rivière ont décelé des cavités naturelles concrétionnées qui démontrent l'existence d'un drainage de l'Urgonien au-dessous du niveau de la rivière.

La Lyonne est alimentée par la source de la Lyonne (source karstique qui sort à la base des calcaires urgoniens), par le Riou du Toit (ou ruisseau des Tuffs) et par le ruisseau des Ranches ou des Ollats (1)

(1) *La source de la Lyonne présente la particularité d'avoir un régime pulsé lorsque son débit est compris entre 90 l/s et 75 l/s. Il est vraisemblable que l'on est en présence d'un phénomène identique à celui de la source de Fontestorbes (cf. Travaux de MANGIN, C.N.R.S., Laboratoire de MOULIS).*

Entre le Riou du Toit et le ruisseau des Ollats, des sources(devenues sous-lacustres depuis la mise en eau) alimentent la rivière. Ces eaux circulent à la base des terrains de couverture.

Bilans hydrologiques : Avant tous travaux, on peut considérer que les apports, à l'amont de la gorge, étaient voisins de 1,27 m3/s pour un bassin versant topographique de 33,6 km2 : soit un débit spécifique de 37 l/s/km2 (44 l/s/km2 en 1967).

Ces débits spécifiques sont supérieurs aux débits spécifiques régionaux (évalués à 25-30 l/s/km2). Il faut donc envisager que le bassin d'alimentation réel est supérieur au bassin topographique ; il est vraisemblable que ce dernier ne prendpasen compte la totalité de la zone drainée par le réseau souterrain des sources de la Lyonne (dont le bassin versant est inconnu).

Enfin, à partir de l'entrée des gorges, dans les calcaires urgoniens, les échanges (pertes et apports) sont complexes entre la Lyonne et les versants.

3 - MISE EN EAU - BILAN - TRAVAUX COMPLEMENTAIRES

Avant la mise en eau, aucun traitement d'étanchéité important n'a été réalisé.

● Historique

La retenue a été mise en eau en 1925.

En 1926, les fuites sont évaluées à 1100 l/s (aucun renseignement n'a pu être recueilli sur la méthode d'évaluation et la localisation des points de fuites).

Entre 1927 et 1931, divers puits et galeries sont creusés rive droite et rive gauche (fig. 4b). Complétés par des injections, ces travaux (11 forages injectés en 1931) permettent de réduire les fuites à 800 l/s.

Entre 1934 et 1949 (voir photo), des travaux d'étanchéité extérieurs sont réalisés (mur en rive gauche, revêtement de surface rive gauche (3000 m2, épaisseur 0,15 m), revêtement gunité au fond). Les fuites sont ainsi ramenées à 600 l/s.

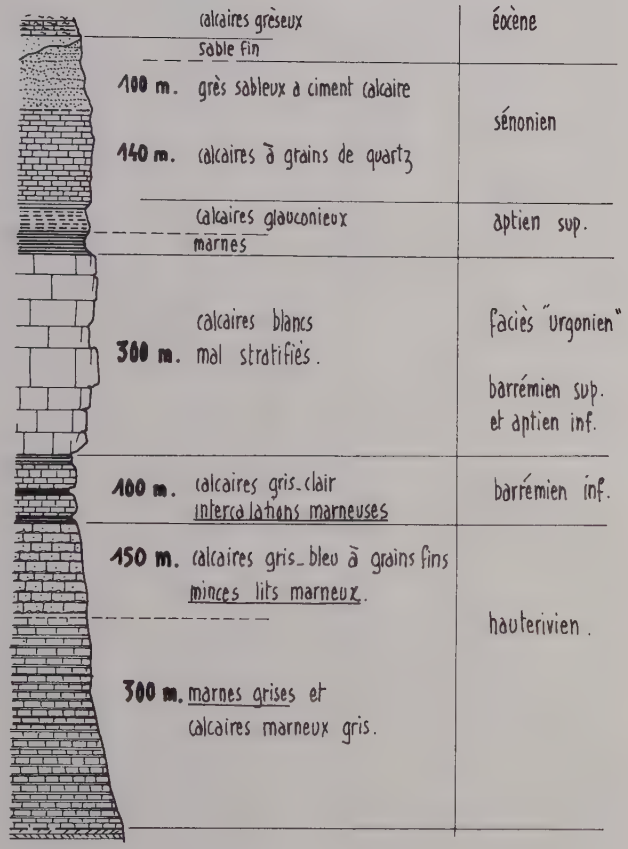
En 1955, un essai de coloration est réalisé. Le colorant ressort à la source des Freydières mettant en évidence le rôle du Sénonien.

En 1958, un tapis complémentaire extérieur rive droite est réalisé (dalle de 0,2 à 0,1 m d'épaisseur).

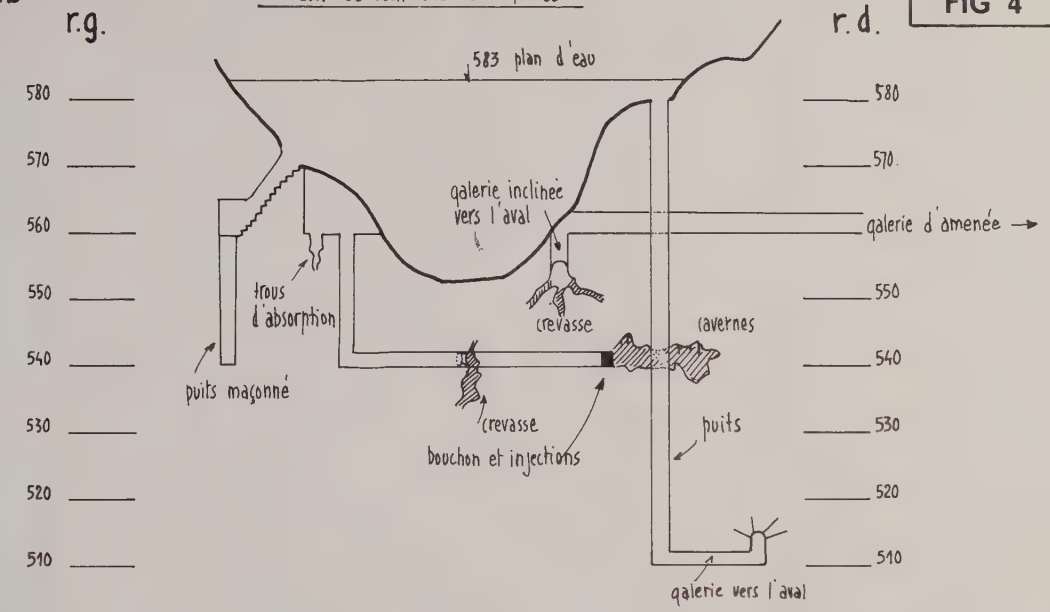
En 1964, la réparation du tapis gunité entre la rive droite et rive gauche est effectuée.

FIG 4

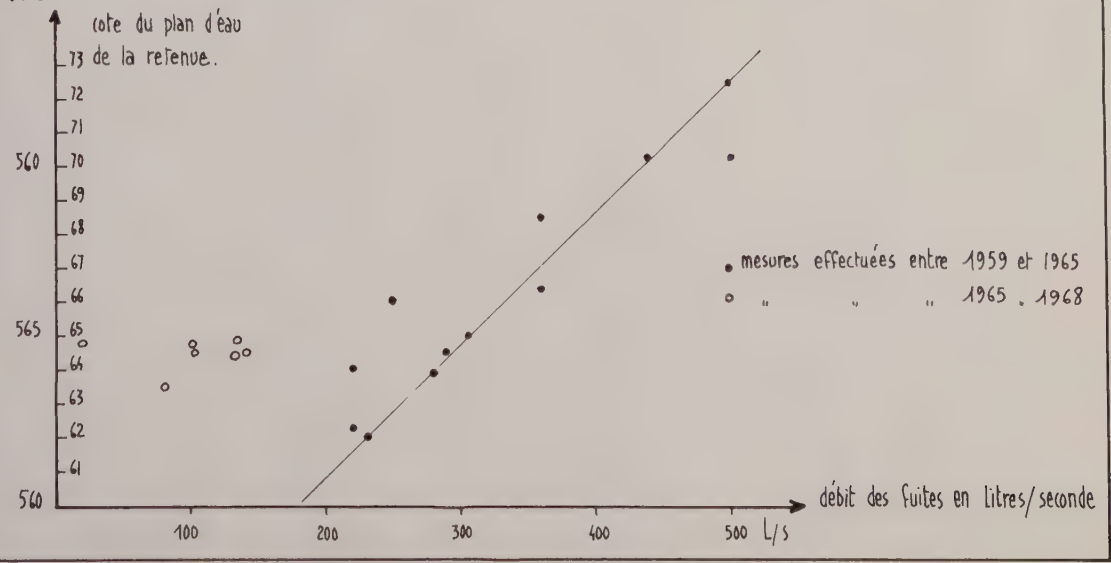
4 a



4.b travaux de recherche des fuites.



4.c



Commentaires :

La fig. 4b situe une partie des travaux réalisés pour rechercher l'origine et traiter les fuites. Il faut noter que la réalisation du puits de 70 m rive droite a été suivie d'une augmentation du débit des fuites.

● Importance des fuites

Le graphique,fig. 4c, donne l'évaluation des débits de fuites en fonction de la cote de remplissage.

Pour la période comprise entre 1960 et 1965, la relation est très nette. Après cette date, la nouvelle technique d'exploitation (optimisation) de la retenue a eu pour conséquence de rendre les mesures de débit plus délicates. A partir de cette date, les mesures ne sont plus effectuées que pour des cotes basses.

● Hydrologie après remplissage

Les différents essais ont montré que les fuites avaient pour origine des infiltrations localisées rive droite et rive gauche dans les calcaires hauteriviens et urgoniens.

Il semble également que certains exutoires naturels situés dans la retenue fonctionnent en trous absorbants lorsque la retenue est pleine. Inversement, certains sondages (S1 et S2) de la série (S1 S6)(fig. 2), réalisés dans la zone d'absorption et qui pénètrent de 12 m dans le rocher, deviennent artésiens en période de pluies.

En rive gauche, la nappe est généralement plus basse que la retenue et s'affaisse vers l'aval. En rive droite, la cote du niveau d'eau dans le S6 est inférieure à celle de la retenue.

4 - CONCLUSIONS - COMMENTAIRES

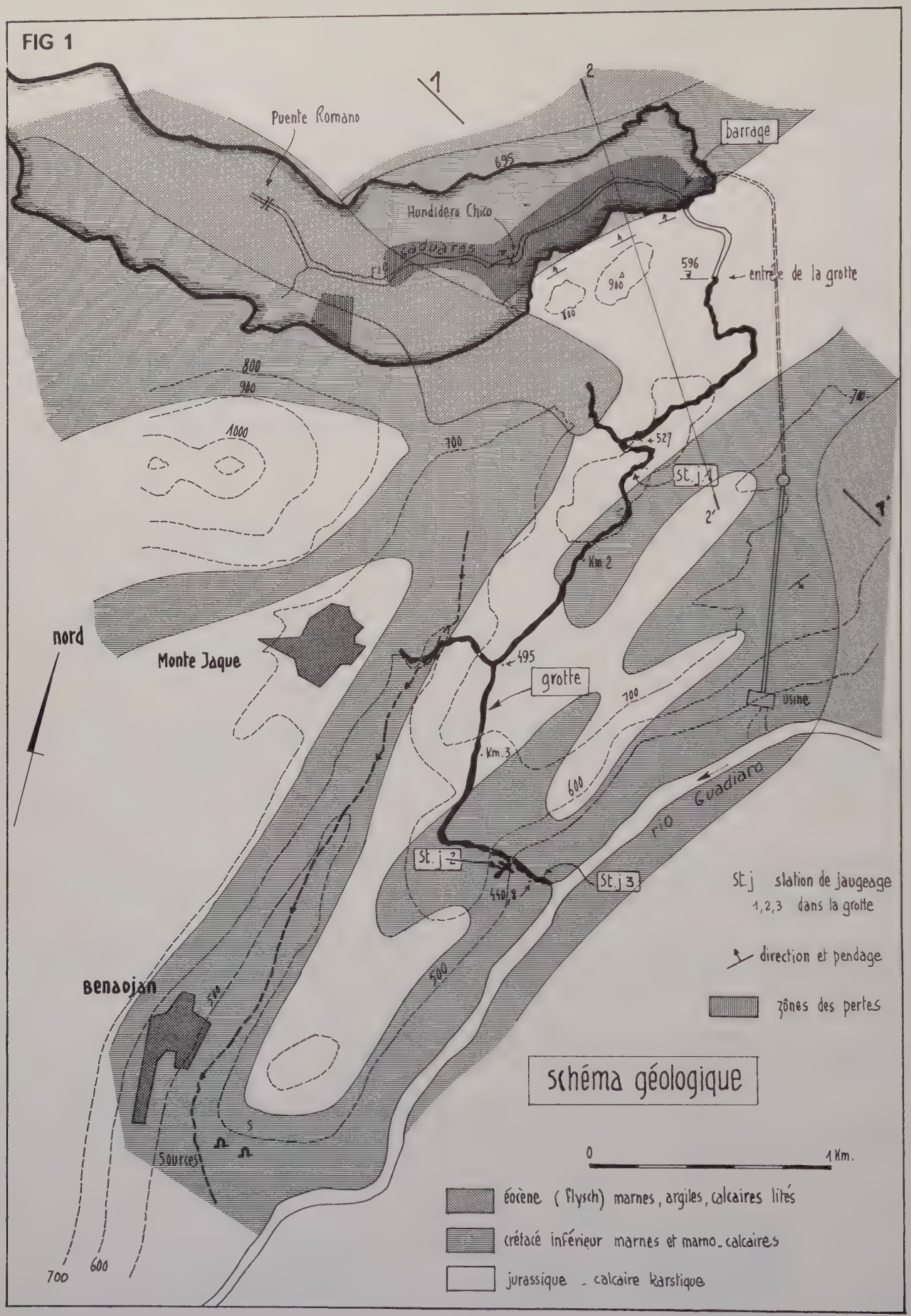
Les fuites sont indiscutablement localisées à proximité du barrage. Les zones d'absorption sont situées non seulement dans les calcaires urgoniens mais également dans les calcaires hauteriviens disloqués.

Les points d'absorption sont bien individualisés et certains paraissent fonctionner en sources, à l'étiage.

L'expérience a montré que, par ailleurs, les revêtements de surface gunités sont vulnérables et se poinçonnent. D'une façon générale, les dalles en béton résistent mieux.

°
° °

FIG 1


Puente Romano
barrage
Hundidero Chico
entrée de la grotte
596
695
960
800
900
1000
700
527
St. j. 1
Km 2
nord
Monte Jaque
495
grotte
Usine
Km 3
600
Guadiaro
St. j 2
St. j 3
440,8
500
Benaojan
Source(s)
700
600
St. j station de jaugeage
1,2,3 dans la grotte
direction et pendage
zônes des pertes
schéma géologique
0
1 Km.
éocène (flysch) marnes, argiles, calcaires lités
crétacé inférieur marnes et marno-calcaires
jurassique - calcaire karstique

CHAPITRE

4

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Montejaque

(Espagne)

PLAN

1 - Généralités
- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème de l'étanchéité

2 - Le cadre naturel

3 - Mise en eau - Bilan - Travaux d'étanchement

°
° °

Figure 1 : Schéma géologique, 1 : 20 000

Figure 2 : Structure, karst, hydrogéologie

Figure 3 : Localisation des fuites, cheminements, résurgences, 1 : 20 000

°
° °

Bibliographie :

- Compania Sevillana de Electricitad (1968), Nota sobre el Embalse de MONTEJAQUE
- LUGEON (1933), Barrages et géologie, PARIS, Dunod, p. 24, photos 1 à 5.

RESUME

Le barrage voûte de MONTEJAQUE (hauteur 73,5 m.) est édifié sur le RIO GADUARES (ESPAGNE DU SUD) à l'aval d'une vallée karstique dont l'exutoire naturel est une rivière souterraine. Une partie des précipitations reçues par le bassin versant s'infiltre pour rejoindre, par des réseaux souterrains, le RIO GUADIARO qui coule 2 km. au sud, 150 m. plus bas.

La rivière souterraine qui relie le RIO GADUARES et le RIO GUADIARO se développe sur plus de 3,8 km; elle illustre l'importance et le degré d'évolution de la karstification régionale.

La mise en eau de la retenue devait s'accompagner de fuites importantes qui ont atteint 4 m^3/s. (pour 0,8 m^3/s. d'apport interannuel moyen au barrage). Les infiltrations se faisaient par des fissures (diaclases) et par des puits absorbants incomplétement bouchés par des colmatages peu résistants. La majeure partie des eaux infiltrées réapparaissaient dans la rivière souterraine. La vitesse des écoulements à partir de la retenue était de 160 à 180 m/h.

Les travaux d'étanchement (colmatage de surface) n'ont pas permis de réduire suffisamment les fuites pour permettre une exploitation économique de la retenue.

SUMMARY

MONTEJAQUE arch dam, 73.5 m high, lies on the RIO GADUARES in Southern Spain downstream of a karstic valley whose natural outlet is an underground river. Some of the rainfall over the catchement infiltrates and passes through underground channels to join the RIO GUADIARO 150 m lower, 2 km to the south.

The underground river connecting the RIO GADUARES and the RIO GUADIARO is more than 3.8 km long and shows the degree and extent of the regional karstification.

There was heavy leakage up to 4 m^3/s when the dam was impounded, as compared with 0.8 m^3/s mean interannual inflow to the dam. The water infiltrated through cracks (diaclases) and swallow holes that were incompletely blocked with weak pluggings. Most of this water reappeared in the underground river. The flow velocity of the leakage from the reservoir was 160 to 180 m/hour.

Remedial work was carried out (surface sealing) but leakage could not be controlled enough for the reservoir to be financially viable.

4 - MONTEJAQUE

Remarque : Cette étude a été réalisée à partir des documents cités en référence, sans qu'il ait été possible de faire une visite des lieux.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Avec 73,5 m de haut le barrage de MONTEJAQUE a été, à l'époque de sa construction, le plus haut barrage voûte d'Europe. Cet ouvrage dont le remplissage total et l'exploitation n'ont jamais pu être menés à bien en raison de l'importance des pertes par rapport aux apports naturels, est l'exemple même de l'ouvrage construit dans une région karstique très évoluée.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage voûte
Hauteur : 73,5 m au-dessus du bed-rock ; 84 m sur fondation
Cote de la crête : 693,5
Rayon de courbure : 36 m
Volume de béton : 30.000 m3

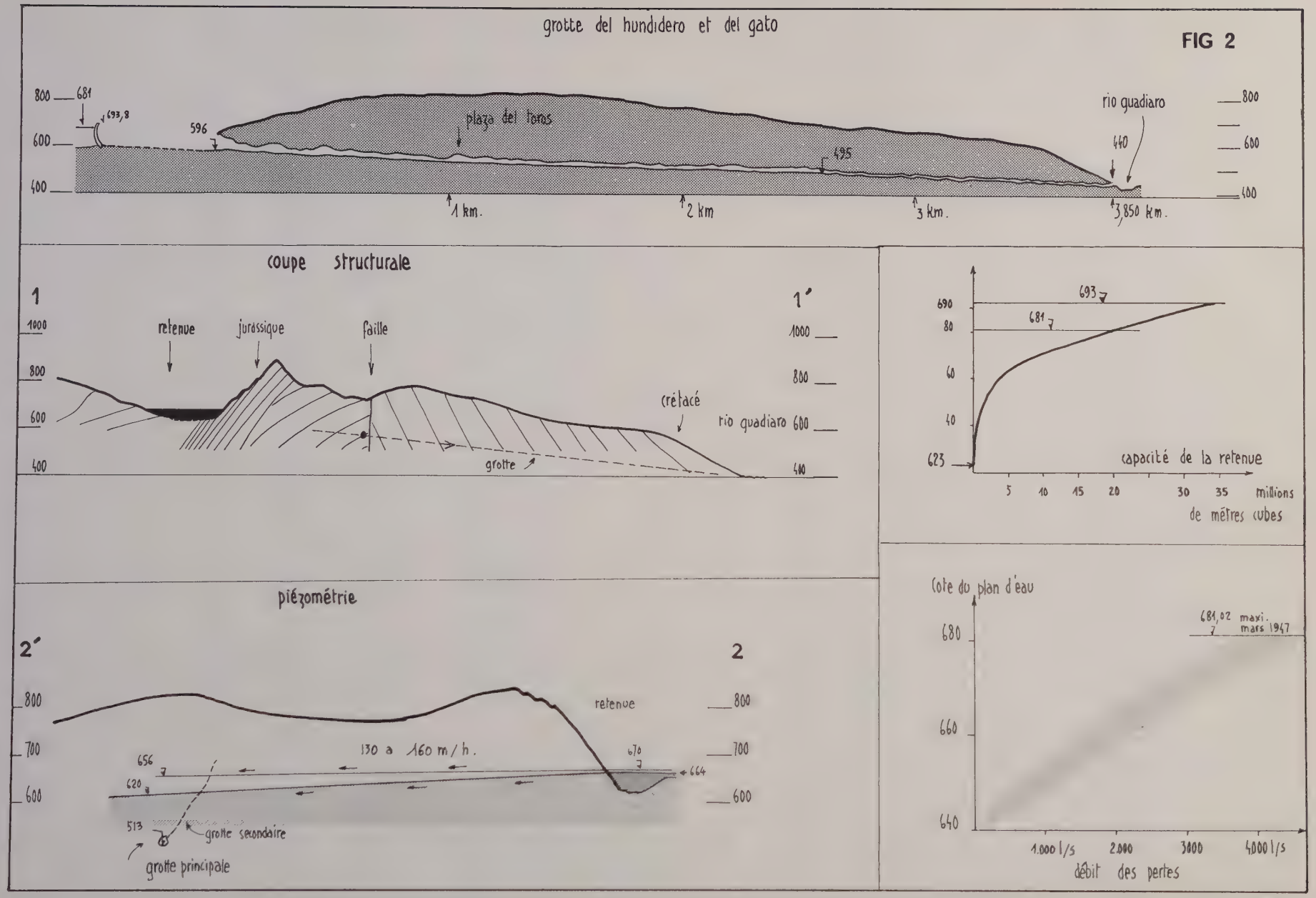
Retenue :
Volume total : 36 millions de m3
Volume utile : 34 millions de m3
Apports moyens annuels : 22 millions de m3 soit 0,8 m3/s

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

L'ouvrage ferme une vallée qui est un véritable poljé modelé en grande partie par l'érosion karstique.

L'étanchéité de la retenue impliquait donc deux conditions, un colmatage naturel du karst, une résistance suffisante de ce colmatage à la pression des eaux de la retenue.

La difficulté était rendue plus grande par la faiblesse des apports naturels moyens 0,8 m3/s.


grotte del hundidero et del gato
FIG 2
800
600
400
681
693,8
596
plaza del toros
495
440
rio quadiaro
1 km.
2 km
3 km.
3,850 km.
coupe structurale
1
1'
retenue
jurassique
faille
crétacé
rio quadiaro
grotte
1000
800
600
400
693
681
690
80
60
40
623
capacité de la retenue
5
10
15
20
30
35
millions
de mètres cubes
piézométrie
2'
2
retenue
130 a 160 m/h.
656
620
513
670
664
grotte secondaire
grotte principale
700
Cote du plan d'eau
681,02 maxi.
mars 1947
680
660
640
1.000 l/s
2.000
3000
4000 l/s
débit des pertes

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE (fig. 1)

Le paysage est caractérisé par un relief rigoureux qui s'élève rapidement à plus de 1000 m de haut. La rivière principale de la région, le Rio Guadiaro, coule à la cote 440 environ à la hauteur de la centrale hydroélectrique du barrage.

A proximité de l'ouvrage, la morphologie de la retenue est dissymétrique ; la rive droite s'élève rapidement par une pente raide jusqu'à la crête qui atteint la cote 1000, la pente moyenne de la rive gauche reste beaucoup plus douce.

L'ouvrage est situé à l'entrée d'un véritable canyon qui se poursuit vers l'aval sur plus de 500 m avant d'atteindre l'entrée de la rivière souterraine, exutoire naturel des eaux du Rio Gaduares.

La courbe de capacité de la retenue (fig. 2) est révélatrice de la morphologie de la vallée à l'amont de l'ouvrage. L'ouvrage est construit à la cote 623 (cote du bed-rock), mais il faut que le plan d'eau atteigne la cote 665 pour que la capacité de la retenue dépasse 5 x 10^6 m3 d'eau.

2.2. GEOLOGIE

Le barrage prend appui sur les calcaires du Jurassique supérieur, mais la retenue se développe en grande partie dans les formations marneuses du Crétacé inférieur et dans les terrains de l'Eocène ; pour mémoire, il faut signaler que les eaux, en queue de retenue, mouillent aussi les sables de l'Oligocène.

Le site du barrage correspond à l'endroit où la rivière recoupe, après les avoir longées, les formations jurassiques. A l'amont immédiat du barrage, la rivière a donc creusé son lit en dégageant les calcaires jurassiques de leur couverture crétacée plus vulnérable à l'érosion. Il résulte de ce fait (fig. 2, coupe 1-1') que, en raison du pendage des couches, le Jurassique se développe sur la rive droite tandis que la rive gauche et le fond de la cuvette sont constitués par les formations du Crétacé et également à l'amont par des formations d'âge éocène.

- Lithologie

Le Jurassique supérieur (Malm à faciès tithonique) est représenté par des calcaires blancs et rouges très compacts, très purs et cassants.

Au-dessus, le Crétacé inférieur (Néocomien) est représenté par des marnes calcaires de couleur rouge et par des marnes argileuses.

L'Eocène qui recouvre localement le Néocomien (Crétacé inférieur) est constitué par des marnes, des argiles et des calcaires lités.

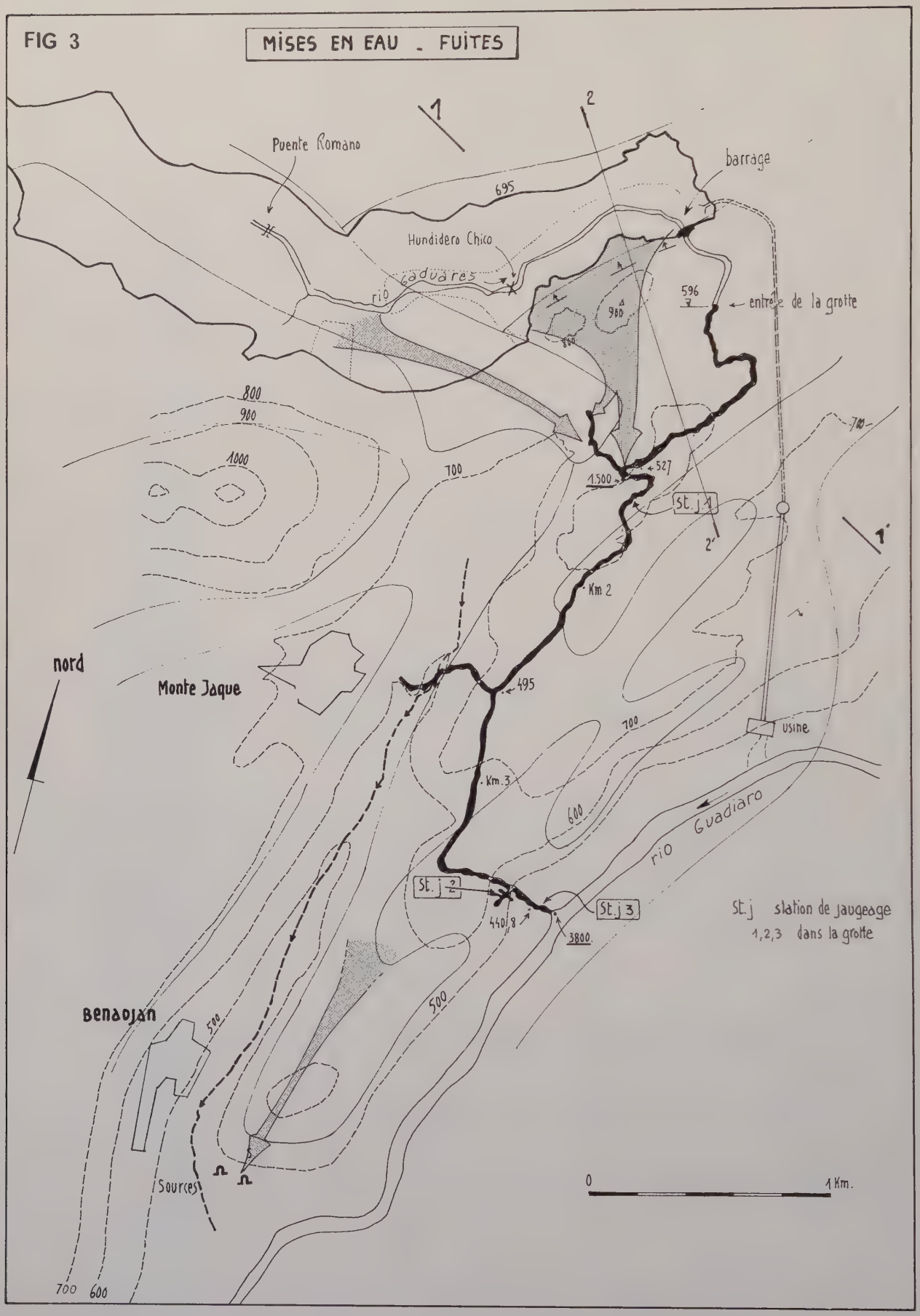


FIG 3
MISES EN EAU . FUITES
1
2
Puente Romano
barrage
695
Hundidero Chico
Zaduares
rio
596
entrée de la grotte
980
800
800
900
1000
700
700
1.500
527
St. j 1
1'
2'
Km 2
nord
Monte Jaque
495
700
usine
Km.3
600
rio Guadiaro
St. j 2
St. j 3
440,8
3800.
St.j station de jaugeage
1,2,3 dans la grotte
Benaojan
500
500
Sources
0
1 Km.
700
600

- Tectonique et fracturation

La carte géologique (fig. 1 et la coupe 1-1' fig. 2) montre que l'élément principal de la structure est un anticlinal complexe à coeur jurassique dont l'axe est sensiblement parallèle au RIO GUADIARO. L'axe de cet anticlinal passe au Nord du village de MONTEJAQUE et à l'aval immédiat du barrage.

Au Sud, le Crétacé en couverture sur le Jurassique constitue la retombée de l'anticlinal vers le RIO GUADIARO. Le pendage moyen des couches est voisin de 30°.

L'axe de l'anticlinal est souligné par des accidents cassants et complexes. Ces accidents sont en majeure partie des fissures de traction qui vont jouer un rôle dans la localisation des réseaux de drainage karstique.

La retombée Nord où se situe la retenue est marquée par la présence des terrains tertiaires qui reposent en discordance sur le Crétacé inférieur.

La fracturation du calcaire jurassique est particulièrement intense.

Les principaux accidents qui soulignent l'axe de l'anticlinal (ex : faille de l'entrée de la grotte) sont en général des failles.

En plus de ces accidents, des réseaux serrés de diaclases bien visibles, en particulier rive droite dans la cuvette, découpent la roche et favorisent la karstification.

2.3. KARSTIFICATION

L'indice le plus spectaculaire est la CUEVA DEL GATO et DEL HUNDIDERO. Longue de 3,8 km (sans compter les réseaux secondaires affluents), cette grotte est une véritable rivière souterraine. La section de la galerie est toujours de grande taille et peut atteindre 40 x 40 m (PLAZA DEL TOROS). La coupe fig. 2, met en évidence la pente régulière (moyenne 38 ‰) du réseau.

L'existence même de ce réseau montre l'importance et le degré d'évolution du karst.

Remarque : Il faut noter la position du réseau sous l'axe du dôme jurassique compris entre le fossé du MONTEJAQUE et la vallée du GUADIARO.

Dans la cuvette du barrage, les indices d'une karstification évoluée sont nombreux. Les mises en eaux successives de la retenue ont, en particulier, dégagé de véritables dolines et des puits absorbants qui étaient masqués par les dépôts alluvionnaires.

2.4. HYDROGEOLOGIE

L'étude hydrologique du RIO GADUARES a mis en évidence le faible rendement hydrologique de ce bassin (38 % seulement des précipitations reçues par le bassin versant sont restitués par la rivière). Cette anomalie est due aux pertes

karstiques. Les eaux infiltrées vont rejoindre par les réseaux souterrains, le RIO GUADIARO dont le bassin versant a ainsi un rendement de 60 %. Ce bilan confirme le caractère général de la karstification dans la région.

L'étude du régime naturel a également montré que, dans la retenue, certains puits d'infiltration fonctionnaient en "Estavelles", c'est-à-dire en puits absorbants en période sèche et en puits émissifs en période de pluies. Ces systèmes typiquement karstiques caractérisent en général des zones où la perméabilité est limitée (par colmatage par exemple). C'est un phénomène classique qui est fréquemment observé dans les poljés qui se transforment par ce mécanisme en lacs pendant les périodes humides.

3 - MISE EN EAU - BILAN - TRAVAUX D'ETANCHEMENT

Les essais de mise en eau de la retenue se sont accompagnés de fuites importantes.

Le régime de ces fuites, la localisation des points d'émergence et des points d'infiltration ont fait l'objet d'études complexes qui se sont poursuivies pendant plus de dix ans. Ces études ont nécessité la mise en place d'importants dispositifs de mesure, notamment de stations de jaugeage dans le réseau karstique souterrain (fig. 1).

Le bilan de ces études peut être résumé comme suit :

- Les zones d'infiltration : fig. 3

Les fuites sont nombreuses et diffuses, il est possible de localiser deux zones principales, situées toutes deux rive droite. L'une est située à proximité du barrage au contact du Jurassique et du Crétacé, l'autre plus en amont dans le Crétacé.

Les points d'absorption sont d'une part des puits karstiques absorbants qui ont "crevé" dans le fond de la retenue lors des mises en eau, et également les multiples fissures qui affectent les calcaires du Jurassique. Ces fissures ont fait, partiellement, par la suite, l'objet de colmatage de surface.

- Zones d'apparition :

La majeure partie des eaux infiltrées ressort dans la CUEVA DEL GATO à 1 km environ de la retenue.

Le tableau ci-après montre le résultat des principales expérimentations réalisées. Les essais 1, 2, 3, 4 consistaient en injection de sel (NaCl)dans la retenue pour vérifier les points d'infiltration, les vitesses de circulation et les pourcentages de Na Cl récupérés. L'essai n° 5 est le bilan d'un essai de vidange.

Date de l'essai	n°	Zone d'injection	Niveau du lac	Quantité injectée	Quantité retrouvée (1) à 1,5 km	à 3,8 km
Avril 1932	1	Près du barrage	642 à 639 vidange	6.000 kg	5.100 kg	
Avril 1933	2	Dans toute la retenue	653 à vide	30.000 kg	18.000 kg	20.000 kg
Décembre 1933	3	Zone del 1'Hundidero Chico	650 à vide	6.000 kg	1.300 kg	1.300 kg
Avril 1934	4	Hundidero Chico avec eau du pont romain	vide	7.000 kg	1.500 kg	
Juin 1934	5	Vidange de 5.10^6 m3	665 à vide		4.10^6 m3	$4,6\ 10^6$ m3

(1) Dans le réseau souterrain (voir plan 1)

L'ensemble des essais et en particulier 1'essai n° 5 montre clairement que la majeure partie des eaux est drainée en direction du réseau karstique.

La deuxième zone d'émergence, décelée par les études, est l'ensemble des sources situées à proximité du village de BENAOJAN (débit inconnu). Il est difficile d'imaginer pour ces sources un cheminement indépendant des fuites par la "cuevas". Il est plus vraisemblable d'envisager qu'elles correspondent à des fuites du réseau karstique entre le point 1.500 et la sortie à 3.800 (fig. 3).

● Importance des fuites

Le schéma, fig. 3, met en évidence le débit des fuites en fonction du niveau de 1'eau dans la retenue, pour des valeurs de la cote du plan d'eau comprises entre 640 et 681,02 (cote maximale atteinte en mars 1947). L'accroissement des fuites est sensiblement linéaire ; il atteint 4000 1/s pour 680. Il dépasse déjà le débit d'apport moyen 0,8 m3/s pour la cote 646. Après plusieurs années d'observation, aucune évolution des débits de fuites n'a été mise en évidence.

L'allure de la courbe débit-hauteur du plan d'eau suggère un contrôle des débits par de nombreuses fissures de taille médiocre avec des écoulements non turbulents.

La coupe 2-2', fig. 2, situe la position des émergences dans les grottes en fonction de la cote du plan d'eau dans la retenue. On remarque immédiatement la pente relativement faible de la "nappe" entre la retenue et la grotte.

Il apparaît par ailleurs d'après la coupe que cette pente diminue quand le plan d'eau monte, ce qui implique une saturation progressive du système de fissures canalisant les pertes vers la grotte.

● Vitesses des circulations

Les essais de mesure des vitesses par marquage des eaux, réalisés à partir de différents points de la retenue, donnent pour les circulations souterraines des vitesses comprises entre 130 et 160 m/h sur des distances de 1 km environ. Il s'agit de vitesses caractéristiques d'un réseau karstique bien évolué. Il y a donc en quelque sorte une contradiction entre cette dernière observation et les deux précédentes.

Enfin, les auteurs signalent, durant les montées rapides du plan d'eau (vraisemblablement en périodes d'orages et en début de remplissage, période durant laquelle la faible capacité de la retenue entraîne une montée rapide des eaux), des bruits souterrains sourds dans la région du barrage. Ces bruits sont accompagnés de secousses "sismiques".

Ce type de phénomènes, plus particulièrement les bruits, a été signalé dans d'autres régions ; il est généralement dû à des masses d'air comprimé par la montée des eaux qui se déplacent brutalement, entraînées par le courant, dans les cavités. La détente au sommet des puits remontants est assimilable à une véritable petite explosion.

Il est vraisemblable que l'on est en présence de phénomènes de ce type. Dans cette hypothèse, il faut envisager l'existence de réseaux souterrains de grande taille, très évolués, tantôt noyés, tantôt dénoyés.

● Travaux d'étanchement

De nombreux travaux d'étanchement ont été réalisés, en particulier un essai de colmatage de surface des fissures, par jointoyage à la truelle. Ces traitements n'ont cependant pas permis une réduction suffisante des pertes pour permettre le remplissage normal de la retenue.

4 - CONCLUSIONS - COMMENTAIRES

L'importance de la karstification est exceptionnelle. Dans une certaine mesure, compte tenu de l'importance de la karstification et de la dénivelée entre la retenue et le RIO GUADIARO, les pertes apparaissent comme relativement faibles. Il est vraisemblable que cela est dû au fait que le karst est en grande partie colmaté, notamment dans les zones proches de la retenue.

Ces divers remplissages ont, d'ailleurs, montré la vulnérabilité de ces colmatages.

°
° °

CHAPITRE

5

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Genissiat

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Problème de l'étanchéité
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel

3 - Traitements - Mise en eau - Bilan

4 - Commentaires - Conclusions

°
° °

Figure 1 : Schéma géologique 1 : 80 000 d'après la carte géologique NANTUA (3e édition)

Figure 2 : Coupes géologiques

Figure 3 : La retenue 1 : 20 000. La topographie a été dessinée d'après la carte IGN 1 : 20 000, SEYSSEL n° 1

°
° °

Bibliographie :

- M. GIGNOUX, J. MATHIAN (1950) - Les conditions géologiques de l'aménagement hydroélectrique du Rhône entre GENEVE et SEYSSEL. - La Houille Blanche (numéro hors série) "GENISSIAT" - 260 pages.
- LUGEON (1933) - Barrages et géologie - PARIS - Dunod - p. 63 à 72.

RESUME

Le barrage poids de GENISSIAT (hauteur 104 m.) est édifié sur le RHONE (FRANCE), dans une gorge creusée dans les calcaires massifs très peu fissurés de l'URGONIEN. Les eaux de la retenue mouillent ces mêmes calcaires sur une très grande surface.

Ces formations calcaires disposées en bancs horizontaux constituent le coeur d'un synclinal à fond plat de plus de 10 km. de large. Ces calcaires karstiques sont en grande partie recouverts par des formations tertiaires et par des dépôts morainiques étanches. Le réseau hydrographique actuel est récent;sous les dépôts quaternaires existe un réseau ancien. Les calcaires karstiques de l'URGONIEN, dont l'épaisseur dépasse 80 m., reposent sur des marno-calcaires du CRETACE qui constituent un plancher étanche. Ces niveaux étanches ont été recoupés dans la rivière en fond de fouille.

Dès l'OLIGOCENE, la karstification a été stoppée par la mise en place en surface de dépôts étanches du TERTIAIRE qui recouvrent encore 85 % de la surface. Dans les calcaires de l'URGONIEN, le karst anté-oligocène est représenté par de grandes cavités colmatées à 100 % par des produits argilo-sableux; les travaux du barrage ont mis à jour un grand nombre de ces cavités. La très faible fissuration du rocher ne permet pas de parler d'une nappe de fissures.

Le voile d'injection, d'extension réduite, a été réalisé avec des consommations très faibles (30 à 50 kg de produits secs par mètre de forage) confirmant la faible fissuration du rocher. La mise en eau n'a été accompagnée d'aucune fuite.

SUMMARY

The 104 metres high GENISSIAT gravity dam on the RHONE in FRANCE is built in a gorge cut through poorly fissured massive URGONIEN limestones, of which very large areas are in contact with the waters of the reservoir.

These limestone formations are arranged in horizontal beds and form the heart of a flat-bottomed syncline more than 10 km wide. They are karstic and are mostly covered by Tertiary formations and impervious moraines. The hydrographic network that exists to-day is recent but there is an older system under the Quaternary deposits. The karstic URGONIEN limestones are more than 80 m thick and overlie a series of calcareous marls of the CRETACEOUS which form an impervious base. These impervious horizons were found in the excavations in the river bed.

Karstification has been halted since the OLIGOCENE because impervious TERTIARY deposits were laid on the surface, and these still cover 85 per cent of the area. In the URGONIEN limestones, the pre-Oligocene karst is represented by large cavities blocked 100 % by clayey and sandy materials; a great number of such cavities were found during the construction of the dam. It can't be spoken of a flowing aquifer in the fractures, because of the too limited rock mass fracturation.

The grout curtain is small and taked very little grout (30 to 50 kg dry weight per metre of drill hole) which confirms that the rock is only slightly fractured. There was no leakage when the reservoir was filled.

1 - GENERALITES

• INTRODUCTION

Le barrage de GENISSIAT a été construit sur le Rhône à 6 km à l'aval de la ville de BELLEGARDE, par la Compagnie Nationale du Rhône.

Le bassin versant à l'amont a une surface de 10.910 km2 ; le débit moyen (calculé sur 20 ans) est, à la hauteur du village de GENISSIAT, de 379 m3/s.

C'est l'ouvrage de tête des aménagements du Rhône, il a été mis en eau en 1948.

• CARACTERISTIQUES

Les caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue sont les suivantes :

Barrage poids évidé (rayon 500 m)
Longueur en crête : 200 m
Hauteur maximum : 104 m sur fondation
Volume : 415.000 m3 de béton

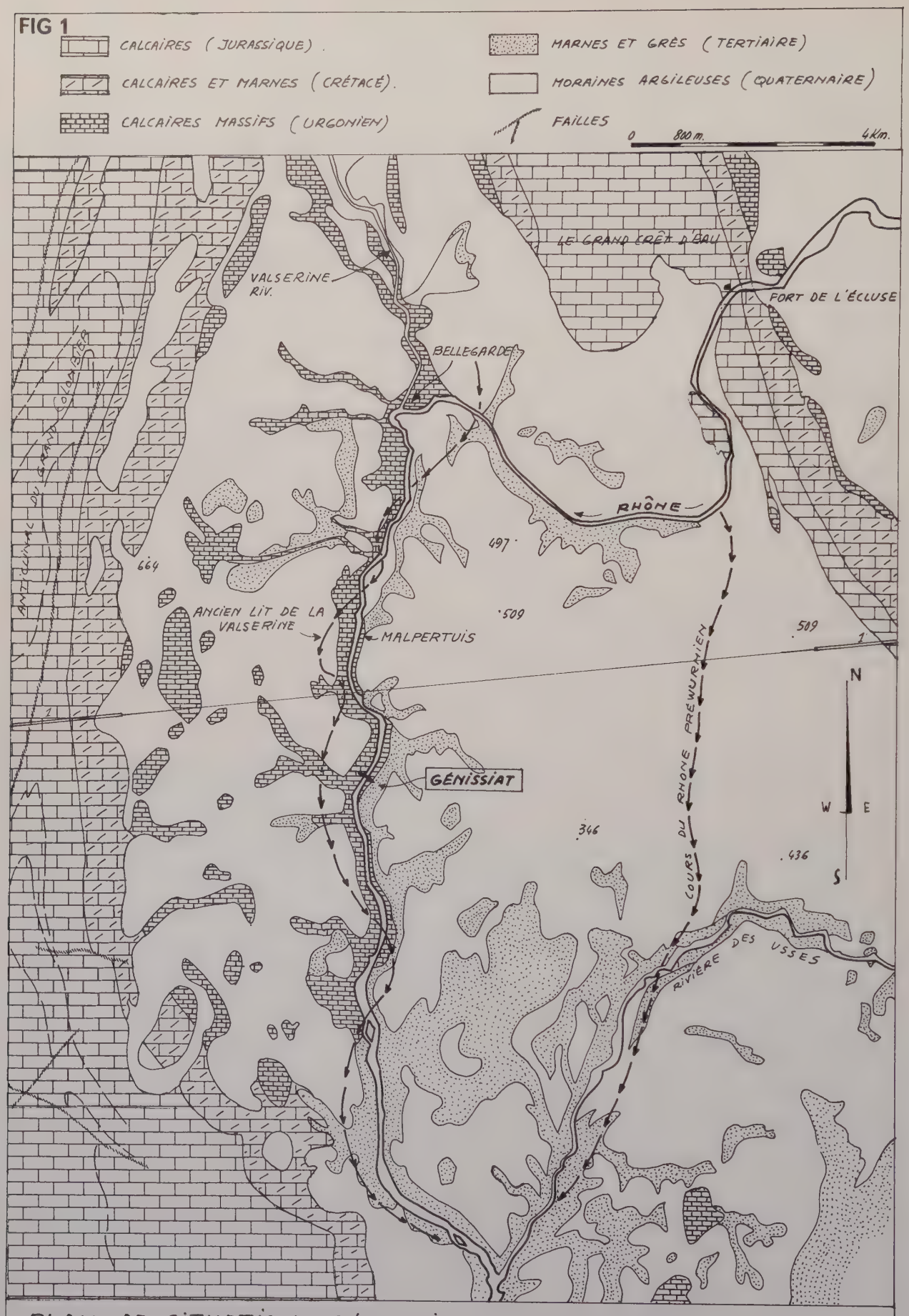
Retenue :
Longueur maximum amont aval : 20 km
Largeur maximum : 500 m (en queue de retenue)
Largeur moyenne : 100 m
Niveau normal du plan d'eau : 330,70

• PROBLEME DE L'ETANCHEITE

L'étanchéité de la retenue du barrage de GENISSIAT pouvait être mise en cause pour deux raisons :

1) Les calcaires de l'Urgonien, qui constituent la majeure partie des rives de la moitié aval de la retenue, sont des formations typiquement karstiques subhorizontales qui se développent en continuité à l'amont et à l'aval du barrage, à une cote inférieure au niveau de la retenue.

2) Les conglomérats et les alluvions préwurmiennes qui recouvrent les calcaires urgoniens et qui se développent également au-dessous de la cote de la retenue, sont des formations souvent très perméables ; elles posaient donc également un problème d'étanchéité. Mais ce deuxième problème est cité pour mémoire, puisqu'il n'entre pas dans le cadre de cette étude consacrée uniquement aux risques de fuites karstiques.



PLAN DE SITUATION GÉOLOGIQUE DU BARRAGE

● LA KARSTIFICATION REGIONALE

On retrouve ici les grands traits de la karstification jurassienne (voir dossier VOUGLANS : chapitre 13)(1).

Le caractère local essentiel est l'importance de la couverture morainique qui recouvre les terrains secondaires et tertiaires et donne son originalité au karst de la région.

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE (fig. 1 et 3)

Entre BELLEGARDE et SEYSSEL, le Rhône coule au fond d'un canyon étroit creusé dans les calcaires urgoniens. Ces calcaires sont localement surmontés par des formations tertiaires. La dureté et l'horizontalité des calcaires urgoniens sont à l'origine de la morphologie de la vallée.

A l'amont de BELLEGARDE et jusqu'au défilé de FORT DE L'ECLUSE, le Rhône coule également au fond d'un canyon ; ce dernier n'est pas creusé dans les calcaires urgoniens mais dans la molasse (formations tertiaires) qui, bien que plus tendre que l'Urgonien, tient cependant en falaise.

C'est seulement à l'amont du défilé de FORT DE L'ECLUSE, dans la plaine de COLLONGE, que la retenue s'élargit pour atteindre sa largeur maximum.

2.2. GEOLOGIE

La coupe 1-1', fig. 2, perpendiculaire au Rhône, est caractéristique de la structure géologique de la région entre BELLEGARDE et SEYSSEL.

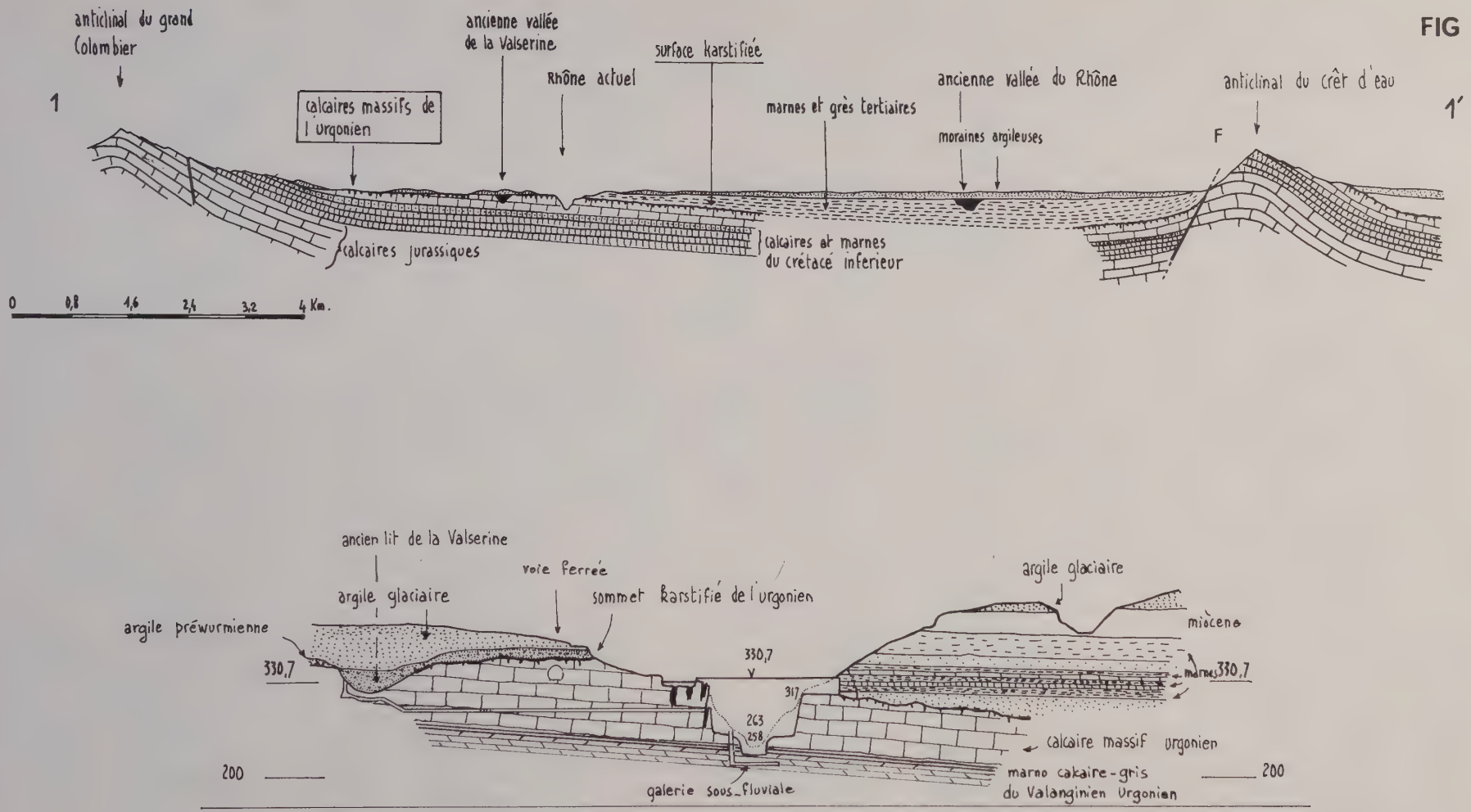
Les anticlinaux du GRAND COLOMBIER à l'Ouest et du crêt d'eau à l'Est, limitent un grand synclinal à fond très plat.

La figure 1 met en évidence l'importance de la couverture morainique qui cache en grande partie les affleurements, sauf sur les reliefs.

Les études géologiques ont montré que cette couverture morainique masque une ancienne morphologie dont le réseau hydrographique était différent du réseau actuel.

(1) *Etudié vers 1960, le projet de VOUGLANS a bénéficié, par rapport au projet de GENISSIAT, des nombreux travaux scientifiques et des explorations spéléologiques réalisés entre 1948 et 1960. Les grands traits de la karstification régionale, résumés dans le chapitre 13, étaient donc connus d'une manière beaucoup plus imparfaite en 1945, lors de l'étude de GENISSIAT.*

FIG 2


anticlinal du grand Colombier
ancienne vallée de la Valserine
surface karstifiée
Rhône actuel
ancienne vallée du Rhône
anticlinal du Crêt d'eau
1
1'
calcaires massifs de l'Urgonien
marnes et grès tertiaires
moraines argileuses
F
calcaires jurassiques
calcaires et marnes du crétacé inférieur
0 0,8 1,6 2,4 3,2 4 Km.
ancien lit de la Valserine
argile glaciaire
voie ferrée
sommet karstifié de l'urgonien
argile glaciaire
argile préwurmienne
miocène
330,7
330,7
marnes 330,7
317
263
258
calcaire massif urgonien
200
marno calcaire-gris du Valanginien Urgonien
200
galerie sous-fluviale

Dans cet ancien réseau hydrographique, le RHONE et la VALSERINE (fig. 1)se rejoignaient plus au Sud à quelques kilomètres de SEYSSEL. La VALSERINE suivait approximativement l'actuelle vallée du RHONE, mais elle coulait à une cote plus élevée.

La gorge de GENISSIAT est donc une morphologie récente.

Stratigraphie - Lithologie (coupes 1-1' et 2-2' : fig. 2)

Les formations du Jurassique supérieur et du Valangien (Crétacé inférieur) constituées par des calcaires compacts, affleurent dans le coeur de l'anticlinal du GRAND COLOMBIER. Ces calcaires sont surmontés par des marno-calcaires intercalés avec des calcaires bicolores à entroques datés de l'Hauterivien (Crétacé inférieur). Ces formations affleurent au fond de la gorge du RHONE à la hauteur du barrage où elles représentent le bed-rock ; elles sont considérées comme étanches.

Au-dessus de ces formations étanches, se développent les calcaires blancs massifs de l'Urgonien dont l'épaisseur dépasse 80 m à la hauteur du barrage et qui constituent les parois du canyon.

Sur l'Urgonien reposent normalement les formations marneuses de l'Aptien, les sables verts du Crétacé moyen et les calcaires marins du Crétacé supérieur. Mais ces formations sont le plus souvent absentes. Cette absence est due à la grande phase d'érosion qui, à la fin du tertiaire, a dégagé puis karstifié les calcaires urgoniens.

Au-dessus du Crétacé supérieur (présent ou absent), les formations tertiaires constituent une série très diversifiée : sable (Eocène), marnes bigarées et calcaires lacustres (Oligocène), sable induré et conglomérat (Miocène), et surtout, la puissante formation de la molasse (grès sableux) épaisse de plusieurs centaines de mètres.

Ces formations tertiaires jouent un rôle indirect mais important vis-à-vis du problème de l'étanchéité karstique. Elles ont constitué et constituent localement encore un tapis étanche sur les calcaires karstiques de l'Urgonien.

Au-dessus enfin, les argiles morainiques quaternaires qui recouvrent en grande partie le fond du synclinal, ont été mises en place par les appareils glaciaires quaternaires qui ont recouvert la région de plusieurs centaines de mètres de glace.

Localement, l'épaisseur de ces dépôts morainiques peut atteindre 200 à 300 m.

2.3. LA KARSTIFICATION

Le caractère fondamental du karst urgonien est que, depuis l'Oligocène jusqu'à aujourd'hui, il a été recouvert et protégé par une puissante couverture de terrains le plus souvent étanches. Sur une grande surface, cette couverture est toujours en place (fig. 3).

Les caractéristiques du karst urgonien (importance, morphologie, remplissage) qui étaient mal connues en raison même de cette puissante couverture, ont été mises en évidence par les travaux au rocher effectués dans le cadre des reconnaissances et lors de la construction de l'ouvrage.

Les principaux indices mis à jour ont été les suivants :

- rive gauche :
  - . entonnoir de dissolution (12 m de profondeur) rempli de sable peu perméable ;
  - . dans la dérivation provisoire, sous 40 m de couverture, poche de dissolution de 15 m de large remplie d'argile verte plus ou moins sableuse. Cette argile injecte également les fissures et les joints (1). La structure du remplissage est tourbillonnaire.
- rive droite :
  - . aven de 4 m à 6 m de diamètre rempli également d'argile verte (2).

D'après M. GIGNOUX et MATHIAN (1950), la couleur verte des matériaux de remplissage est considérée comme le résultat d'une réduction des sels ferriques en sels ferreux, sans cependant négliger l'existence des sables verts de l'Eocène qui ont indiscutablement participé aux colmatages.

Par sa généralité, le phénomène est néanmoins exceptionnel et mérite d'être signalé.

2.4. HYDROGEOLOGIE

Le RHONE constitue le niveau de base des "nappes" de fissures pouvant exister dans les calcaires urgoniens.

Dans certaines zones, la réalité et surtout l'importance de ces nappes peuvent être mises en doute en raison de la très faible fissuration du rocher.

Par exemple, sur le site de GENISSIAT, les travaux au rocher ont permis les observations suivantes :

- rive droite, dans le puits à la cote 233, soit 30 m sous le niveau du RHONE, le rocher était sec ;
- les galeries de reconnaissance creusées à partir du fond du puits et passant sous la rivière, se sont révélées également sèches.

(1) *Certains joints sont injectés de filon de grès.*

(2) *La terra rosa, remplissage habituel des karsts, se rencontre uniquement dans les fissures les plus superficielles qui sont considérées comme représentant la karstification actuelle. Cette dernière ne s'est développée qu'au bord du canyon du RHONE dans les zones dégagées de leur couverture morainique.*

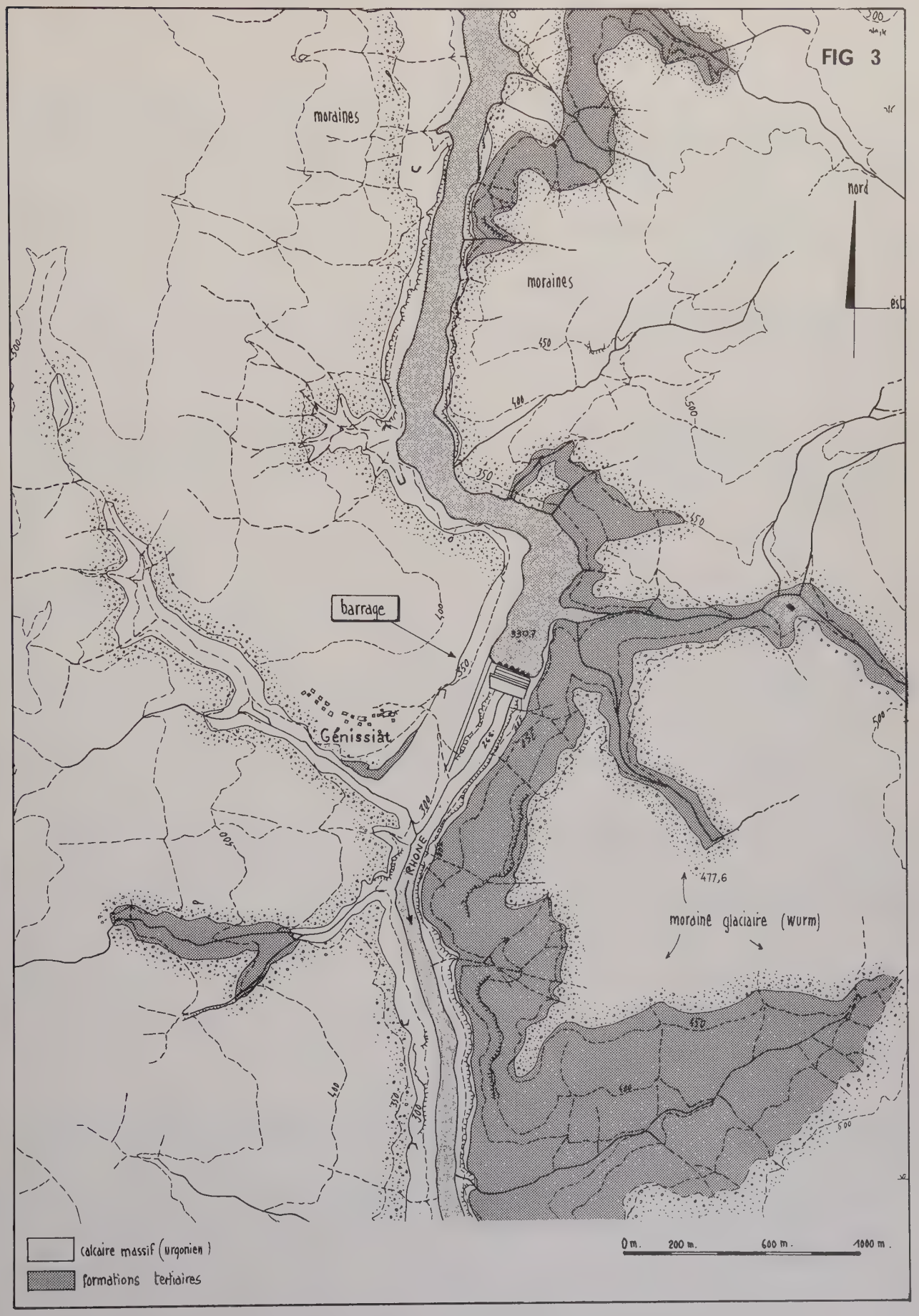


FIG 3
moraines
moraines
nord
est
barrage
330,7
Génissiat
RHONE
477,6
moraine glaciaire (wurm)
calcaire massif (urgonien)
formations tertiaires
0 m.
200 m.
600 m.
1000 m.

Sur le site de MALPERTUIS (fig. 1), la galerie sous-fluviale qui passe sous la rivière avec 4,5 m de couverture, rencontra une seule venue d'eau sérieuse (50 l/s) et quelques fissures. Hormis ces quelques fissures, le rocher était sec.

Après la mise en place des batardeaux, aucune venue d'eau n'a été observée dans l'Urgonien.

En conclusion, il paraît exagéré de parler de "nappes" de fissures pour une formation qui apparaît très peu fracturée et qui, par ailleurs, est recouverte sauf aux abords immédiats du canyon, par une couverture imperméable.

Remarque :

Il faut cependant considérer, en raison de la structure (fig. 2), qu'une partie des apports reçus par l'anticlinal du GRAND COLOMBIER peut alimenter une nappe de fissures située dans les calcaires et drainée par le RHONE. Cette hypothèse suggérée par la structure géologique régionale, n'est étayée par aucune observation.

3 - TRAITEMENTS - MISE EN EAU - BILAN

3.1. TRAITEMENTS

Etanchéité des remplissages naturels

L'absence de venue d'eau naturelle dans les galeries montre l'étanchéité relative du remplissage.

En sondage, un essai-test sur une fissure colmatée a montré qu'il était nécessaire d'atteindre une pression de 16 kg/cm2 pour provoquer un débourrage. La réalité du débourrage était vérifiée par le fait que la fissure testée débouchait 2,5 m plus bas dans une galerie artificielle qui permettait d'observer le phénomène de débourrage.

Travaux d'étanchement au rocher

Le voile principal est situé dans le prolongement du parement amont du barrage.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- profondeur : 17 m sous le point le plus bas des fouilles (certains forages atteignent 90 m) ;
- développement latéral : 40 m dans les falaises ;

- consommation : 30 à 50 kg par mètre, soit 23 kg par m2 de voile (1) ;
- pression maximum : 30 kg/cm2.

Un voile secondaire est situé dans le plan du parement aval du socle de fondation commun au barrage et à l'usine.

Au total, 9700 m de forages ont été faits et 1665 t de coulis injectées.

3.2. MISE EN EAU - BILANS

La mise en eau s'est effectuée rapidement (en une journée) en raison de l'importance des apports.

Aucune fuite n'a été observée.

Les drains creusés derrière le voile amont ne débitent pas. Quelques drains supplémentaires de 200 mm de diamètre, forés en 1953, sont également sans débit.

4 - COMMENTAIRES - CONCLUSIONS

La fracturation particulièrement faible et le colmatage exceptionnel par sa compacité (et sa couleur) du karst sont les deux caractères géologiques les plus marquants de la retenue de GENISSIAT.

L'étanchéité de la retenue, malgré un traitement d'étanchéité réduit, apparaît comme la conséquence de ces deux caractères.

°
° °

(1) *A l'exception d'une zone médiocre située rive droite entre les cotes 290 et 320 qui a absorbé 150 t de ciment, à partir d'une dizaine de forages.*

Photo R. THER

LE BARRAGE DE CHARMINE-MOUX
Vue générale depuis l'aval

On remarque la position originale de l'ouvrage au sommet d'une rupture de pente.
Les calcaires du Jurassique supérieur sont stratifiés en bancs épais et compacts ; les joints : 1, soulignés par l'érosion, sont très nets mais ne contiennent pas de remplissage argileux.
La roche est constituée par une pâte très fine qui lui confère une grande solidité.
On distingue, masquant partiellement le rocher, des placages de tufs : 2, déposés par les eaux.

CHAPITRE

6

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Charmine_Moux

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème de l'étanchéité
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel - Cheminements possibles - Possibilités de fuites

3 - Traitement - Mise en eau - Bilan

4 - Commentaires

°
° °

Figure 1 : Carte géologique 1 : 20 000 - Fond topographique d'après les cartes IGN MOIRANS-EN-MONTAGNE 6-7 et NANTUA 2-3

Figure 2 : Coupes structurales, profil en long de la rivière

Figure 3 : Carte géologique à la cote 380, les risques de fuites, 1 : 20 000

Figure 4 : Mises en eaux, cheminements et résurgences, 1 : 5 000

Photo : Vue générale de l'ouvrage depuis l'aval - Photo R. THEROND

°
° °

Bibliographie :

- RIVIERE, LESCAIL (1955) - Rapport concernant les travaux d'étanchement de la retenue de CHARMINE-MOUX Ain - Communication au 5e Congrès des Grands Barrages, Paris 1955, question n° 16, R. 76, 16 pages
- SOLETANCHE (1952) - Barrages en pays calcaires à caractères karstiques - Géologie et procédés d'étanchement - Tiré à part, 14 pages
- SOLETANCHE (1953) - Barrage de CHARMINE-MOUX - Géologie, travaux d'étanchement - Tiré à part, 14 pages.

RESUME

Le barrage poids de CHARMINE-MOUX (hauteur 18 m.) est situé sur l'OIGNIN, affluent de l'AIN, dans le JURA FRANCAIS.

A l'amont du barrage, l'OIGNIN coule dans l'axe d'un synclinal dissymétrique constitué par des calcaires du Jurassique supérieur dont l'épaisseur dépasse 400 m. L'ouvrage est situé au sommet d'une série de cascades qui apparaissent comme une rupture de pente très nette sur le profil en long de la rivière. A l'aval de ces cascades, l'OIGNIN s'écarte de l'axe synclinal. Dans l'emprise de la cuvette, les calcaires sont le plus souvent masqués par des moraines perméables.

La karstification des calcaires du JURASSIQUE est importante. Dans la région, de nombreux réseaux karstiques de grande taille ont été explorés; l'histoire de ces réseaux est complexe; ils ont été colmatés par des matériaux fluvio-glaciaires pour être ensuite décolmatés. Près de la retenue, de nombreuses dolines sont visibles sur les crêtes calcaïres. Le synclinal de l'OIGNIN est en partie drainé par un réseau souterrain dont l'exutoire est une source karstique (la FONTAINE NOIRE) située 800 m. à l'aval du barrage, à l'intersection de l'axe du synclinal et de la gorge de l'OIGNIN.

La faible capacité de la retenue devait permettre de multiplier les mises en eau expérimentales. Le bilan de ces essais a été le suivant :
- Augmentation du débit de la FONTAINE NOIRE qui passe de 30 l/s à plus de 250 l/s.
- Apparition de nombreuses résurgences, notamment en rive gauche, avec décolmatage d'anciens conduits karstiques.
Les travaux d'étanchement complémentaires nécessités par l'importance des fuites ont été réalisés à partir d'un sondage en liaison directe avec le réseau karstique. Par ce sondage, plusieurs milliers de tonnes de matériaux à forte granulométrie ont pu être injectés. Parallélement, sur les affleurements calcaires, des traitements de surface ont été réalisés par injection sur plus de 3.000 m^2.

Finalement, en Novembre 1950 la mise en eau totale a pu être réalisée sans être accompagnée de fuites notables, mettant ainsi en évidence l'efficacité du traitement.

SUMMARY

CHARMINE-MOUX gravity dam is 18 m high on the OIGNIN, a tributary to the AIN in the FRENCH JURA.

Upstream of the dam, the OIGNIN flows along the axis of a dissymetric syncline consisting of Upper Jurassic limestones more than 400 m thick. The dam is located at the top of a series of waterfalls which appear on the longitudinal profile of the river as marked kinks in the slope. Downstream of the falls, the OIGNIN diverges from the axis of the syncline. The limestones are usually mantled by pervious moraines in the reservoir area.

There is major karstification of the Jurassic limestones and a number of large karst systems have been explored in the region. Their history is complex as they were blocked by glacio-fluviatile material and then re-opened. Near the reservoir, there are many sink-holes visible on the limestone ridges. The OIGNIN syncline is partially drained by and underground systems whose exit is a karstic spring, the FONTAINE NOIRE 800 m downstream of the dam , where the axis of the syncline and the OIGNIN gorge intersect.

The reservoir's small capacity made it possible to make a number of experimental fillings. The results so far obtained are as follows :
- outflow from the FONTAINE NOIRE increased from 30 l/s to more than 250 l/s,
- a number of new springs appeared, mainly on the left bank, where old karst channels re-opened, and - the remedial works required but such large leakage were carried out from a bore-hole connecting up directly with the karst system, through which several thousand tons of coarse-grained material were injected. At the same time, shallow-depth blanket grouting over more than 3000 m2 of limestone outcrops was carried out.

The reservoir was completely filled eventually in November 1950 without any marked leakage, which revealed the effectiveness of the treatment works.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de CHARMINE-MOUX est situé sur l'OIGNIN, affluent rive gauche de l'AIN; il a été construit par Electricité de France entre 1947 et 1950.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage poids
Hauteur : 18 m
Longueur en crête : 180 m

Retenue :
Cote du plan d'eau : 381 NGF
Surface : 750.000 m2
Capacité : 5 x 10^6 m3
Apports moyens : 10 m3/s

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

La retenue du barrage de CHARMINE-MOUX occupe le fond d'un synclinal perché, situé 100 m au-dessus de la vallée de l'AIN. A vol d'oiseau, la distance qui sépare l'OIGNIN de l'AIN est voisine de 1600 m.

Tous les terrains mouillés par la retenue sont suspects si on fait abstraction des matériaux fluvioglaciaires qui les recouvrent partiellement. Les formations karstiques se développent en continuité à l'amont et à l'aval de la retenue à une cote inférieure à celle du plan d'eau.

● LA KARSTIFICATION REGIONALE

La retenue de CHARMINE-MOUX est située dans le même contexte karstique régional que la retenue du barrage de VOUGLANS,qui est à quelques kilomètres en amont ; on retrouve donc ici les mêmes caractères généraux du karst.

Résumé (voir chapitre 13) :

En 1966, pour le seul département du Jura, 850 grottes et avens avaient été recensés. C'est dans les puissantes séries calcaires du Jurassique que se situe la majeure partie d'entre eux (1).

L'histoire de la karstification jurassienne apparaît complexe. Dans bien des cas, les réseaux karstiques, aujourd'hui fonctionnels, sont des karsts anciens, rajeunis au quaternaire.

(1) *Voir première partie : chapitre 1.*

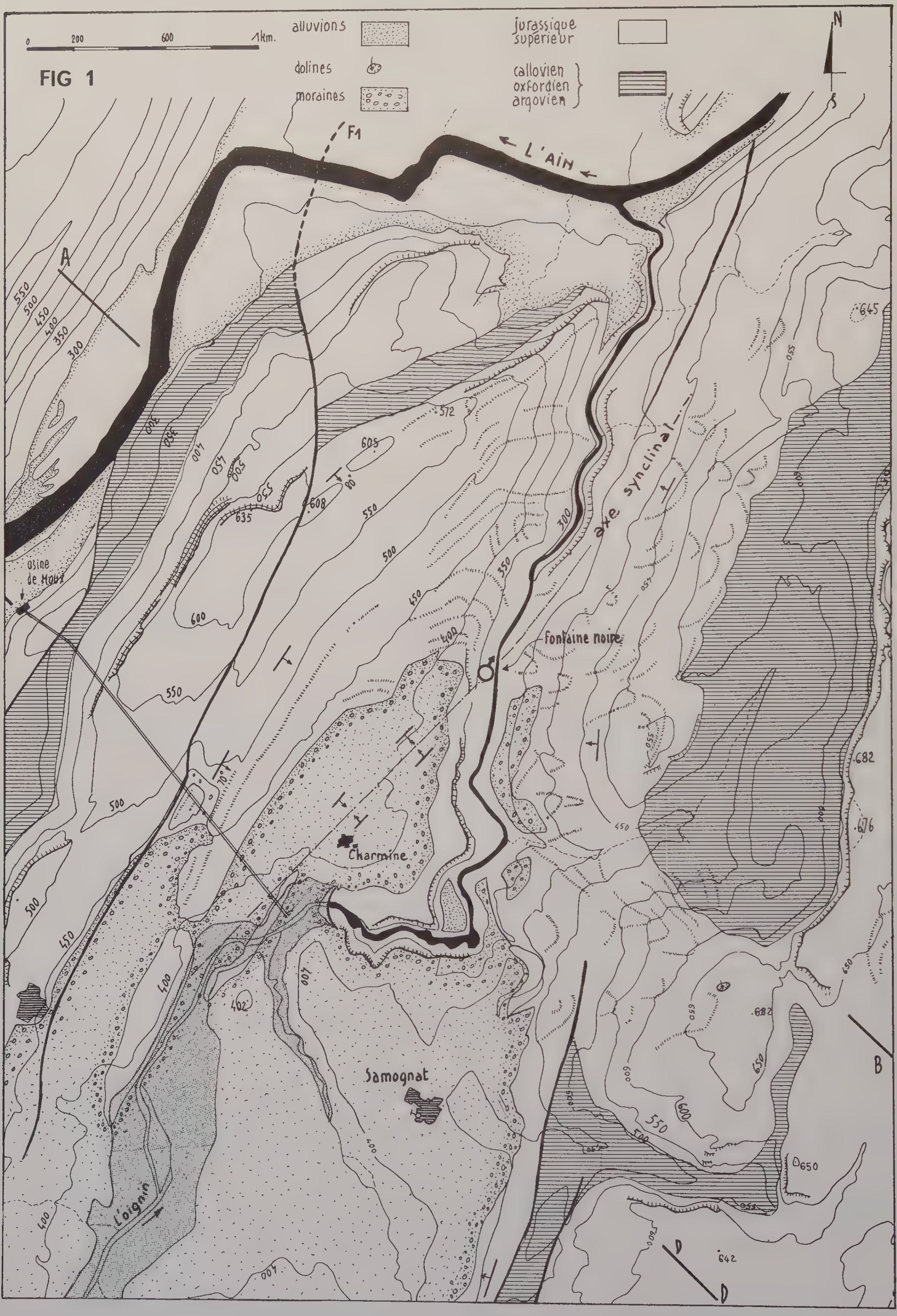


FIG 1
0 200 600 1km.
alluvions
dolines
moraines
jurassique supérieur
callovien
oxfordien
argovien
N
L'AIN
F1
A
B
D
axe synclinal
Fontaine noire
Charmine
Samognat
L'Oignin
usine de Moux
572
605
608
635
645
682
676
650
642
402

L'époque quaternaire a été marquée, dans le JURA, par deux périodes glaciaires et par des mouvements tectoniques. Ces phénomènes ont eu 3 conséquences :

1) un remplissage par des dépôts glaciaires (moraines, sables, argile) de certaines vallées et un colmatage important des réseaux karstiques ;

2) des variations du niveau de base des rivières ;

3) un régime très variable des apports pluviométriques.

Ces faits expliquent la complexité des réseaux karstiques : galeries partiellement colmatées, galeries noyées, nouveaux exutoires, etc.

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE

L'ouvrage (photo 1) est situé exactement sur une rupture de pente très marquée (fig. 2, coupe 2c) du cours de la rivière. A l'aval du barrage, l'OIGNIN coule entre deux falaises entaillées dans des couches calcaires horizontales. A l'amont de l'ouvrage, au contraire, les moraines et les alluvions fluvioglaciaires recouvrent en quasi totalité les formations calcaires qui n'ont été que très faiblement entaillées ; dans cette zone, la vallée est large et la pente des versants est faible. A proximité de la retenue, les affleurements sont rares.

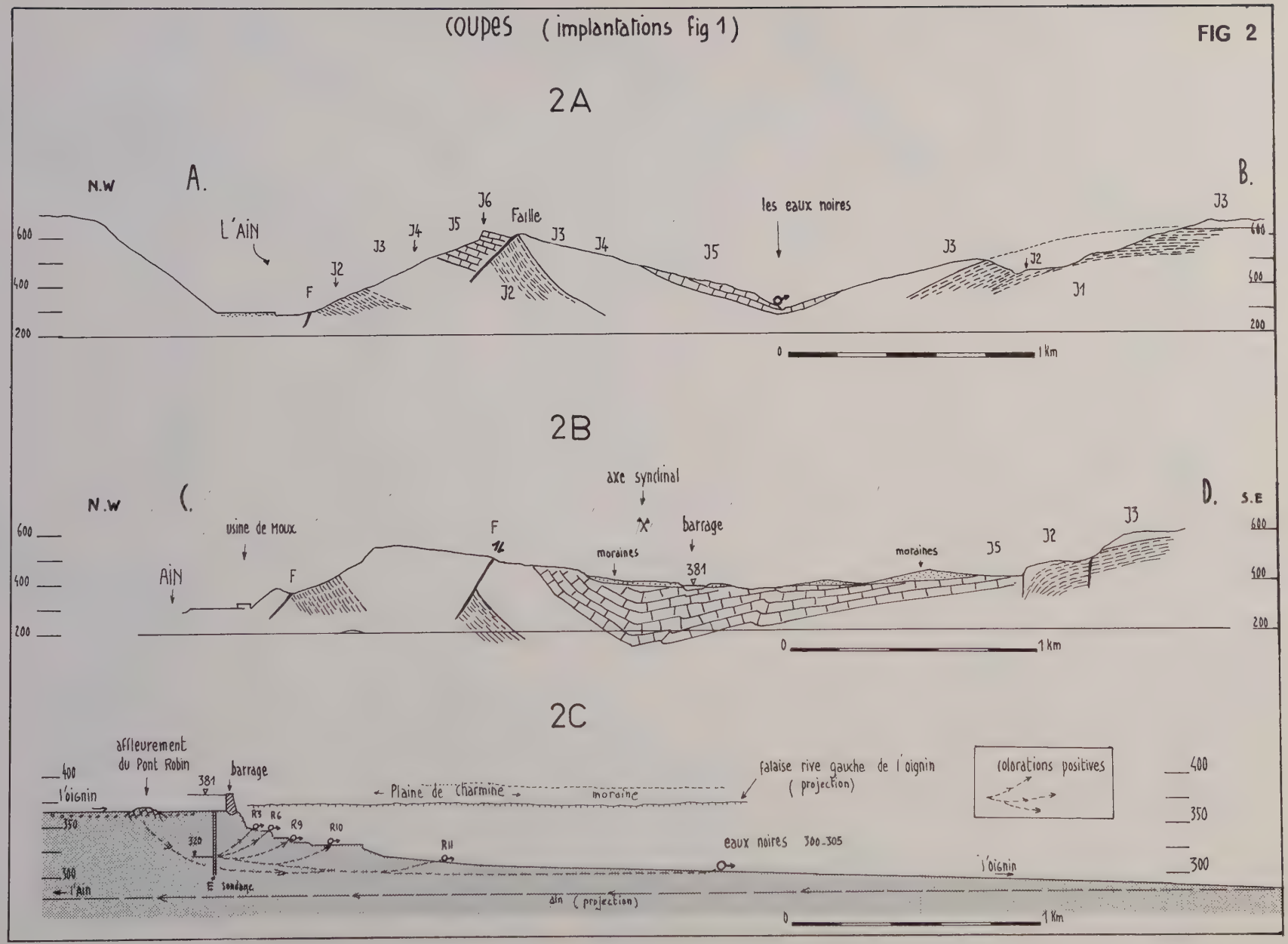
Le profil en long de la rivière (coupe 2c) est caractéristique ; il peut être divisé en 3 zones :

- à l'amont du barrage, une zone à pente faible ;
- entre le barrage et le point R11, une zone à pente extrêmement rapide ; longueur 600 m ; dénivelée : 45 m soit 75 ‰ ;
- à l'aval du point R11 jusqu'au confluent avec l'AIN, une zone où la pente diminue rapidement ; pente moyenne 13 ‰.

2.2. GEOLOGIE

Structure - Tectonique

Jusqu'au site du barrage, l'OIGNIN coule au fond d'un synclinal (fig. 1 et 2). Les coupes AB et CD mettent en évidence la structure "en gouttière" des formations géologiques ; elles montrent également la dissymétrie du synclinal : sur le flanc NW de ce dernier, les couches sont très redressées, le pendage peut atteindre 70 à 80° ; le flanc SE au contraire, présente un pendage faible le plus souvent inférieur à 15°.


COUPES (implantations fig 1)
FIG 2
2A
N.W
A.
B.
L'AIN
J6
Faille
J3
J4
J5
J2
F
les eaux noires
J1
600
400
200
0
1 km
2B
N.W
C.
D.
S.E
usine de Moux
AIN
F
axe synclinal
barrage
moraines
381
J5
J2
J3
2C
affleurement du Pont Robin
barrage
381
l'oignin
Plaine de Charmine
moraine
falaise rive gauche de l'oignin (projection)
colorations positives
R3
R6
R9
R10
R11
320
eaux noires 300-305
l'oignin
l'Ain
sondage
Ain (projection)
400
350
300

A l'aval du barrage, l'OIGNIN s'écarte de l'axe anticlinal ; il coule vers l'Est, dans des gorges creusées dans le flanc SE du synclinal. Son cours se redresse ensuite vers le Nord pour recouper l'axe du synclinal à la hauteur de la source de la FONTAINE NOIRE.

Cette structure synclinale relativement simple est compliquée par l'existence de failles parallèles à l'axe synclinal. La faille F1 en particulier, supprime localement (fig. 3) la barrière étanche constituée par les marnes du Callovo-Oxfordien.

Lithologie - Stratigraphie

Les calcaires du Jurassique supérieur dont l'épaisseur dépasse 400 m, constituent les terrains les plus récents du synclinal (moraines mises à part). Ce sont des calcaires francs ou légèrement marneux (photo 1), à pâte fine, stratifiés en bancs épais. Les joints sont visibles mais ils ne correspondent pas à des discontinuités très nettes. Il s'agit plutôt d'une variation dans le rythme de la sédimentation.

Cette série calcaire repose sur une série de calcaires grumeleux et sur des marnes bleues (appartenant au Callovo-Oxfordien et à l'Argovien). La figure 3 (carte géologique du terrain arrasé à la cote 380) montre que les séries marneuses remontent au-dessus du niveau du plan d'eau de chaque côté du synclinal sauf rive gauche où la faille F1 abaisse les marnes.

Les formations quaternaires qui recouvrent partiellement les calcaires sont de nature diverse : moraines, alluvions fluvio-glaciaires, éboulis de pente. Leur épaisseur est variable et leur étanchéité toujours douteuse. Dans l'emprise de la cuvette dont la surface totale atteint 750.000 m2, le tapis morainique présente une épaisseur très faible sur plus de 50.000 m2 ; sur 10.000 m2 les calcaires affleurent sans couverture.

2.3. KARSTIFICATION - HYDROGEOLOGIE

Sur la rive droite de l'OIGNIN, le plateau calcaire est constitué par des séries peu inclinées ; les dolines y sont nombreuses. Rive gauche, en raison du fort pendage des couches, les indices karstiques sont moins visibles.

Dans la vallée, à l'amont du site du barrage, la couverture morainique masque le rocher ; à l'aval du site, sur les parois des gorges de l'OIGNIN, les indices sont nombreux et très nets. Il s'agit le plus souvent de conduits de joints impénétrables, en grande partie colmatés par de l'argile et par des dépôts concrétionnés.

La source de FONTAINE NOIRE est typiquement une source karstique ; elle sort à l'intersection de l'axe du synclinal et de la vallée de l'OIGNIN. Elle ramène à l'OIGNIN les eaux qui s'infiltrent dans les calcaires exposés (non recouverts par la moraine) situés à l'amont dans le synclinal.

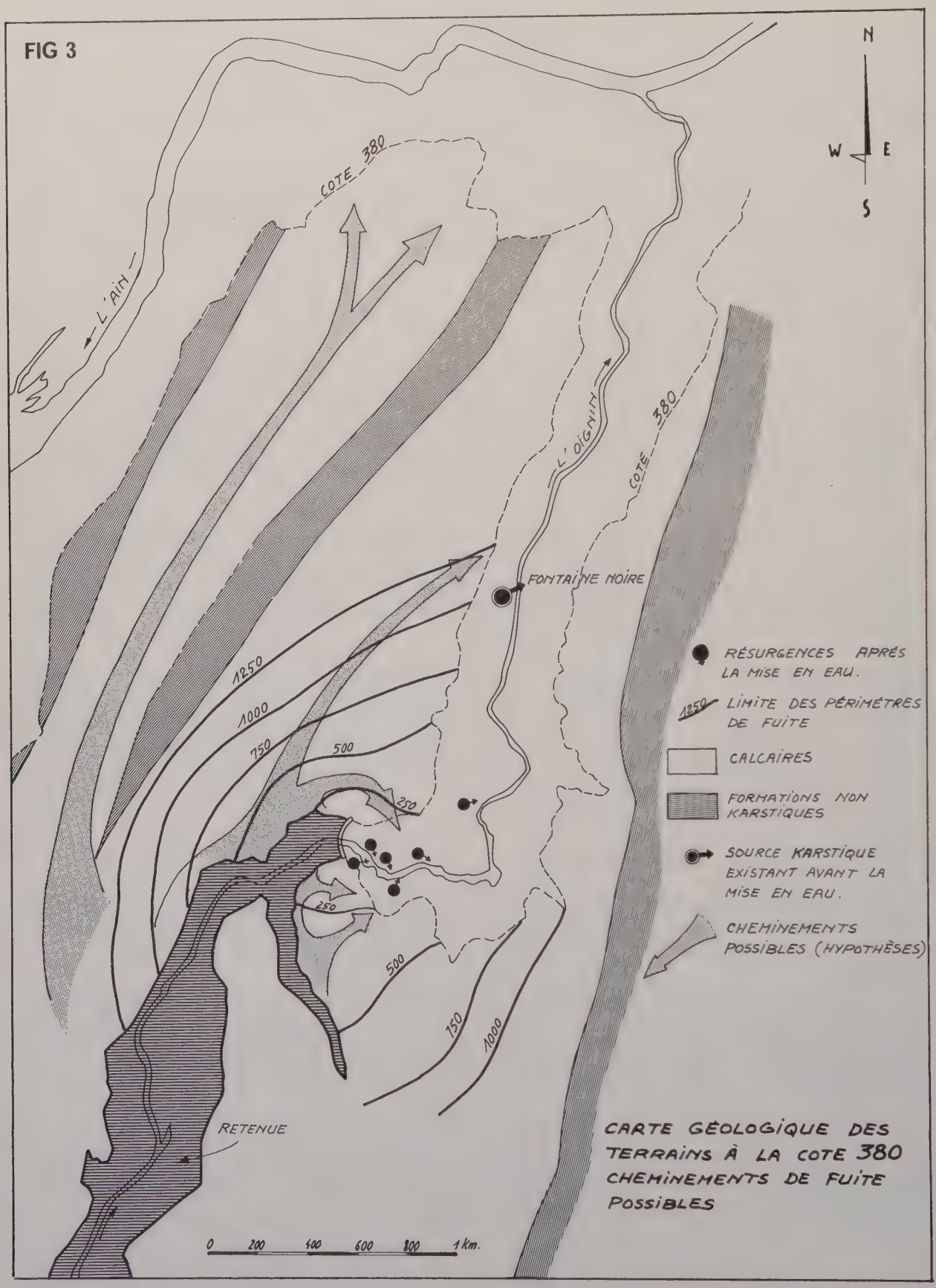


FIG 3
N
W
E
S
COTE 380
L'AIN
L'OIGNIN
COTE 380
FONTAINE NOIRE
1250
1000
750
500
250
250
500
750
1000
RETENUE
0 200 400 600 800 1 Km.
RÉSURGENCES APRÉS LA MISE EN EAU.
LIMITE DES PÉRIMÈTRES DE FUITE
CALCAIRES
FORMATIONS NON KARSTIQUES
SOURCE KARSTIQUE EXISTANT AVANT LA MISE EN EAU.
CHEMINEMENTS POSSIBLES (HYPOTHÈSES)
CARTE GÉOLOGIQUE DES TERRAINS À LA COTE 380
CHEMINEMENTS DE FUITE POSSIBLES

Les reconnaissances ont mis en évidence quelques-unes des caractéristiques de ce réseau karstique. Le bilan de ces reconnaissances est présenté sur la figure 4a :

- à l'entrée de la galerie de dérivation, une fissure ouverte absorbe tous les apports locaux (10 l/s). Le colorant injecté ressort 22 h plus tard à la FONTAINE NOIRE, située 1300 m à l'aval ; vitesse : 60 m/h ;
- dans l'emprise du barrage, le colorant injecté dans une "marmite de géant" ressort 20 h plus tard à FONTAINE NOIRE, soit une vitesse de 60 m/h également.

Il est logique d'admettre (cette disposition est d'ailleurs illustrée par d'autres exemples) que le drain principal de FONTAINE NOIRE se développe suivant l'axe du synclinal.

Enfin, du point de vue hydrogéologique, il est évident que dans ce synclinal calcaire, l'OIGNIN ne représente pas le niveau de base.

2.4. CHEMINEMENTS POSSIBLES - POSSIBILITES DE FUITES

Les cheminements de fuites possibles ont été dessinés en tenant compte des hypothèses suivantes :

- Les marno-calcaires et les marnes de l'Argovien et du Callovo-Oxfordien constituent un niveau étanche.
- Tous les calcaires du Jurassique supérieur sont karstifiés et par conséquent suspects.
- Le tapis, constitué par les formations fluvio-morainiques qui recouvrent partiellement les calcaires, assure une protection insuffisante.

La figure 3 présente les différentes possibilités envisagées :

- cheminement 1 : rive droite ; il correspond à un contournement du barrage par des cheminements très courts (250 m) en raison de la topographie de la cuvette et de la topographie de la vallée de l'OIGNIN, à l'aval immédiat du barrage.
- cheminement 2 : rive gauche ; il correspond à un contournement court de l'ouvrage.
- cheminement 3 : rive gauche ; il correspond à une des circulations karstiques, à moyenne distance, suivant l'axe du synclinal et en direction de FONTAINE NOIRE.
- cheminement 4 : rive gauche ; il correspond à un cheminement à longue distance (3000 m) en direction de l'AIN avec franchissement de la faille F1 qui abaisse les séries marneuses du Callovo-Oxfordien.

3 - TRAITEMENT - MISE EN EAU - BILAN

• Voile d'étanchéité

Compte tenu des résultats fournis par les reconnaissances, l'ouvrage a été complété par un voile d'étanchéité ayant les caractéristiques suivantes :

- profondeur moyenne : 20 m ;
- constitué par 15 forages ;
- 16.400 m3 de produits injectés (sable, argile, ciment)
  dont : 4700 m3 dans un seul forage,
  9500 m3 dans 2 forages, sans arriver au blocage.

• Essais de mise en eau de la retenue

L'étanchéité de la retenue et l'efficacité du traitement ont été testées par deux essais de mise en eau partiels et un essai de mise en eau maximum.

Mise en eau partielle (2 essais), septembre/octobre 1949. Le niveau est monté à 369 (cote du bed-rock 363), soit une montée de 6 m.

Résultats :

- le débit de la FONTAINE NOIRE passe de 30 l/s à 80 l/s ;
- à l'aval du barrage, 2 résurgences apparaissent en rive droite à proximité de l'ouvrage (cheminement type 1) ;
- des produits injectés apparaissent à la source de la FONTAINE NOIRE.

Lorsque le niveau de l'eau atteint la cote 375 (soit une montée de 12 m), l'évolution des fuites est la suivante (plan 4b) :

- apparition brusque de nombreuses résurgences rive gauche;
- les eaux se troublent (argile), il y a débourrage ;
- le débit atteint : 150 l/s à la FONTAINE NOIRE.

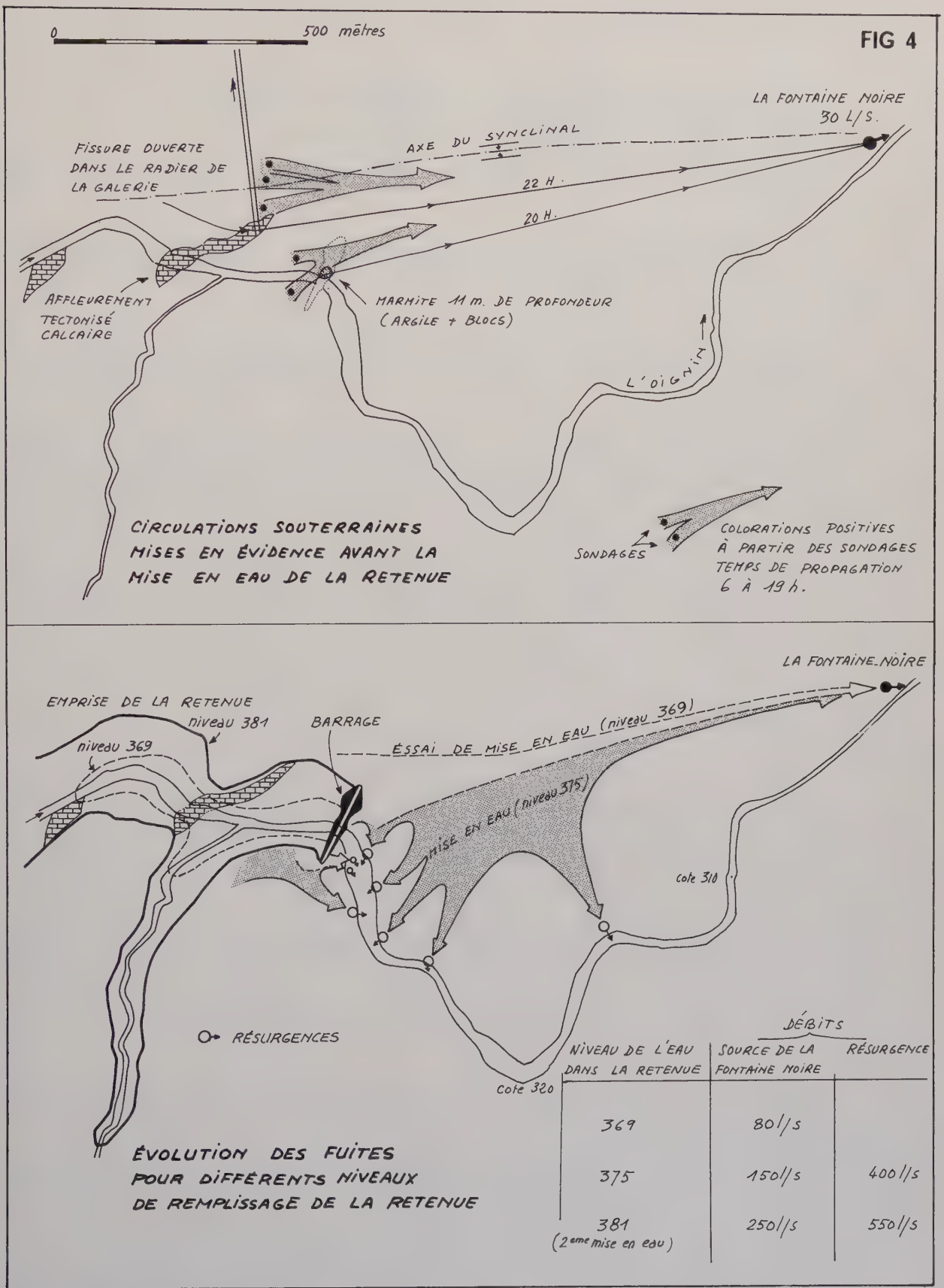
Pour la cote maximum 381, l'évolution se poursuit :

- le débit de la FONTAINE NOIRE dépasse 150 l/s ;
- les résurgences débitent 400 l/s ;
- à toutes les résurgences apparaissent des produits injectés.

D'une façon générale, le phénomène de débourrage est très net. Après chaque mise en eau, le débit reste supérieur à ce qu'il était avant.

Après ces essais, la retenue est vidangée et une phase de traitement est entreprise à partir du forage E qui est en liaison avec toutes les résurgences. Le but poursuivi est de constituer des filtres près des résurgences afin d'éviter le rejet des matériaux injectés. 2630 m3 de graviers et 540 tonnes de coulis épais sont ainsi injectés sans pour autant arriver au blocage.

FIG 4



NIVEAU DE L'EAU DANS LA RETENUE	DÉBITS	
	SOURCE DE LA FONTAINE NOIRE	RÉSURGENCE
369	80 l/s	
375	150 l/s	400 l/s
381 (2ème mise en eau)	250 l/s	550 l/s

Après cette première phase de traitement, une nouvelle mise en eau à 381 est réalisée (janvier 1950).

Le débit total des fuites atteint 800 1/s ; des produits injectés continuent à sortir aux résurgences, mais à niveau de l'eau égal dans la retenue les débits sont plus faibles qu'au cours des essais antérieurs.

On constate également que le temps de transfert du colorant vers les résurgences diminue.

Par ailleurs, la quantité d'eau stockée dans le terrain peut être évaluée à 300.000 m3 ; il faut 3 semaines pour essorer le terrain, après vidange de la retenue.

Une nouvelle phase de traitement avec des matériaux de gros diamètre (Ø 8 et 10 mm) est reprise à partir du sondage E ; un traitement de surface par injection (700 t) est réalisé sur une surface de 3000 m2 de calcaire située près du pont ROBIN.

Durant ces traitements, les débits aux sources et aux résurgences diminuent. Les piézomètres mettent en évidence la remontée de la nappe confirmant la création de bouchons près des émergences.

Le sondage E arrive au refus et peut être bloqué.

Finalement, en novembre 1950, la mise en eau totale de la retenue ne s'accompagne que des fuites minimes mettant en évidence l'efficacité du traitement.

4 - COMMENTAIRES

Il faut d'abord noter que, malgré la faible hauteur du barrage(17 m), le plan d'eau à 381 est situé 60 m au-dessus de la cote de l'exurgence de la FONTAINE NOIRE (cote 320). La cote de cette source représente vraisemblablement (à quelques mètres près) le niveau des circulations pérennes au-dessous de la retenue.

Il faut également remarquer que l'apparition des résurgences et des débourrages s'est faite sous une charge faible.

Notons également que la faible capacité de la retenue a permis des essais multiples ce qui est assez exceptionnel.

La multiplicité des essais a permis également d'obtenir une valeur des vides karstiques : 3 ‰. Cette valeur est intéressante car elle représente les vides d'un massif supérieur à 100.000.000 m3. C'est donc un test exceptionnel.

Enfin, la vitesse de transfert augmente au début du traitement des conduits karstiques. Cette constatation a, depuis, été confirmée par des expériences analogues.

°
° °

CHAPITRES

7.8

LES RETENUES DES BARRAGES DE Castillon ET DE La Chaudanne

(France)

Les ouvrages de CASTILLON et de LA CHAUDANNE construits sur le VERDON, sont situés à 4 km l'un de l'autre. Ils sont donc dans le même contexte géologique et karstique.

Il a paru logique, pour éviter les répétitions, de les présenter ensemble. Les figures sont également communes aux deux projets. Pour conserver le plan habituel des exposés, chacun des deux barrages fait cependant l'objet d'un chapitre distinct.

°
° °

Figure 1 : Carte géologique au 1 : 20 000

Figure 2 : Coupes structurales et lithologiques

Figure 3 : Les voiles d'étanchéité

Figure 4 : Les cheminements possibles, 1 : 20 000

- Fond topographique dessiné d'après la carte IGN CASTELLANE n° 1

Photo 1 : Le site du barrage de LA CHAUDANNE rive droite (1)

Photo 2 : La série du Jurassique supérieur (CASTILLON rive gauche)

Photo 3 : Fracturation et injection de calcite

°
° °

CASTILLON and CHAUDANNE dams on the VERDON are only 4 km from each other and so lie within the same geological context.

It seemed natural to deal with them together to avoid repetition, and the same applies for the figures. However, each is covered by a separate chapter to comply with the pattern adopted for the rest of the monographs.

Photo R. THERO

Photo 2
LE BARRAGE DE CASTILLON
Vue partielle de l'ouvrage depuis l'aval

L'emplacement de prise de vue est indiqué sur la figure 1.
On remarque la puissante série bien stratifiée du Kimméridgien-Portlandien. Au sommet de la falaise commence le Crétace : 1.
Au fond, l'appui rive droite du barrage est découpé par des réseaux de cassures : 2, évoqués dans le texte.
Les éboulis qui tapissent le bas de la falaise au premier plan ont été enlevés par l'eau à proximité des ouvrages de vidange : 3.
Les trainées sombres sur le rocher sont des suintements au niveau de certains joints : 4.

CHAPITRE

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Castillon

(France)

PLAN

1 - Généralités
   - Introduction
   - Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
   - Problème de l'étanchéité
   - La karstification régionale

2 - Le cadre naturel - Possibilités de fuites - Cheminements possibles

3 - Traitement d'étanchéité - Mise en eau - Bilan

°
° °

Bibliographie :

- BARBIER, GIGNOUX (1955) - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques - PARIS - Masson et Cie éditeurs

- EHRMANN (1950) - Barrage de CASTILLON - Observations et mesures lors des opérations de mise en eau - La Technique Moderne, janvier 1950, tome V, n° 1, 8 pages.

- ISCHY (1948) - Barrage de CASTILLON - Lutte contre les érosions souterraines - IIIe Congrès des Grands Barrages, STOCKHOLM,1948, Q. 10, R.36, 21 pages.

RESUME

Le barrage voûte de CASTILLON (hauteur 100 m.) est construit sur le VERDON (affluent de la DURANCE, Alpes du Sud FRANCE) à l'entrée d'une gorge creusée par l'érosion fluviatile dans les calcaires du Jurassique supérieur.

A l'amont immédiat du barrage, les eaux de la retenue mouillent les calcaires karstiques du Jurassique; plus à l'amont, ces mêmes calcaires sont recouverts par des marno-calcaires du Crétacé qui assurent une étanchéité relative quand leur épaisseur est suffisante. La puissance de la série calcaire karstique dépasse 150 m.; au-dessous de cette série, les marnes grises du Callovo-Oxfordien constituent un plancher étanche. La fracturation des bancs calcaires est nette : cassures rectilignes bien visibles en bordure de falaise, diaclases à remplissage de calcite.

La karstification n'est pas spectaculaire; sur les crêtes, de nombreuses dolines sont visibles, mais aucune cavité notable n'est connue. Avant la mise en eau, quelques sources sortaient dans le VERDON au pied des versants calcaires et également en rive droite, dans la zone suspecte du col de la BLACHE.

En raison de la structure géologique, des cheminements pouvaient être envisagés, non seulement à proximité de l'ouvrage mais également à travers la rive droite à moyenne distance. L'étanchéité des appuis a été améliorée par un voile d'injection de 46.000 m². (5.000 t. de produits secs ont été injectés). La mise en eau, en 1949, ne devait donner lieu à aucune fuite notable (débit maximum estimé 100 l/s).

SUMMARY

CASTILLON arch dam is 100 m high on the VERDON, a tributary to the DURANCE in the southern French Alps, at the entrance to river-cut gorge through Upper Jurassic limestones.

Immediately upstream of the dam, there are karstic Jurassic limestones in contact with, the reservoir water. Further upstream, the same limestones are covered by cretaceous calcareous marls confering a relative watertightness on the system whenever they are thick enough. The karstic limestone series is more than 150 m thick and below it there are collovian Oxfordian grey marls forming an impervious base. The fracturation of the limestones beds follows a definite pattern. Straight cracks are clearly visible at the edges of cliffs and joints are filled with calcite.

The karstification is not spectacular. On the ridges, many sink-holes are visible but no cavity has been found. Before the reservoir was filled, there were a few springs flowing into the VERDON at the toe of the limestone slopes and in the suspect zone around the BLACHE col, on the right bank.

Because of the geological structure, it was possible to imagine seepage paths not only near the dam but again through the right bank at some distance from it. The watertightness of the abutments was improved with a 46,000 m² grout curtain for which 5000 tons dry weight of material was injected. When the reservoir was filled in 1949, there was no serious leakage, the maximum flow rate was estimated at 100 litres/s.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de CASTILLON est l'ouvrage de tête du VERDON. Il contrôle un bassin versant de 655 km2 qui lui apporte un débit moyen de 13,2 m3/s.

Commencé en 1928-32, il a été terminé par Electricité de France en 1948 et mis en eau en 1949, après une mise en eau partielle en 1948.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage voûte mince
Rayon de courbure : 70 m
Hauteur maximale : 100 m sur fondation
Longueur en couronnement : 200 m
Volume : 125.000 m3 de béton
Cote IGN du plan d'eau : 880

Capacité de la retenue : 149 x 10^6 m3

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

L'ouvrage prend appui sur la puissante série calcaire du Jurassique supérieur. Dans l'emprise de la retenue, ces calcaires sont en grande partie protégés des eaux par les marno-calcaires du Crétacé qui les recouvrent en concordance. L'étanchéité de ces marno-calcaires devient cependant douteuse lorsque leur épaisseur est faible, ce qui est le cas, en particulier, à proximité de l'ouvrage.

Mouillés sur les deux rives, à l'amont immédiat du barrage par les eaux de la retenue, les calcaires du Jurassique se poursuivent vers l'aval en continuité à une cote inférieure à celle du plan d'eau, et affleurent dans le versant en plusieurs points.

Par contre, dans les parties amont de la cuvette, le problème de l'étanchéité ne se pose pas en raison de la structure géologique complexe qui découpe les calcaires en petites unités séparées les unes des autres par des terrains étanches.

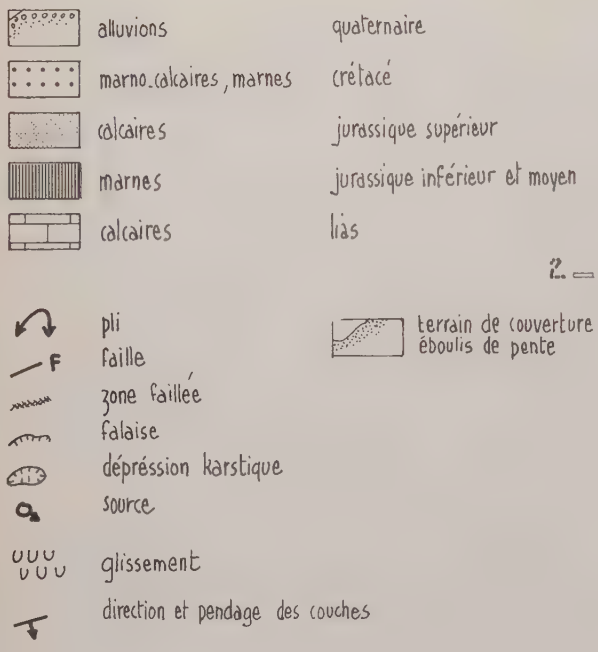
● LA KARSTIFICATION REGIONALE

Il n'existe malheureusement aucune étude exhaustive du karst de cette région.

Les indices karstiques sont nombreux et nets dans les formations du Jurassique supérieur de la région de CASTELLANE. La karstification affecte également les calcaires du Crétacé (sources temporaires, grottes, petits réseaux), mais les variations rapides des faciès du Crétacé rendent difficile l'extrapolation des caractères karstiques locaux d'une zone à une autre.

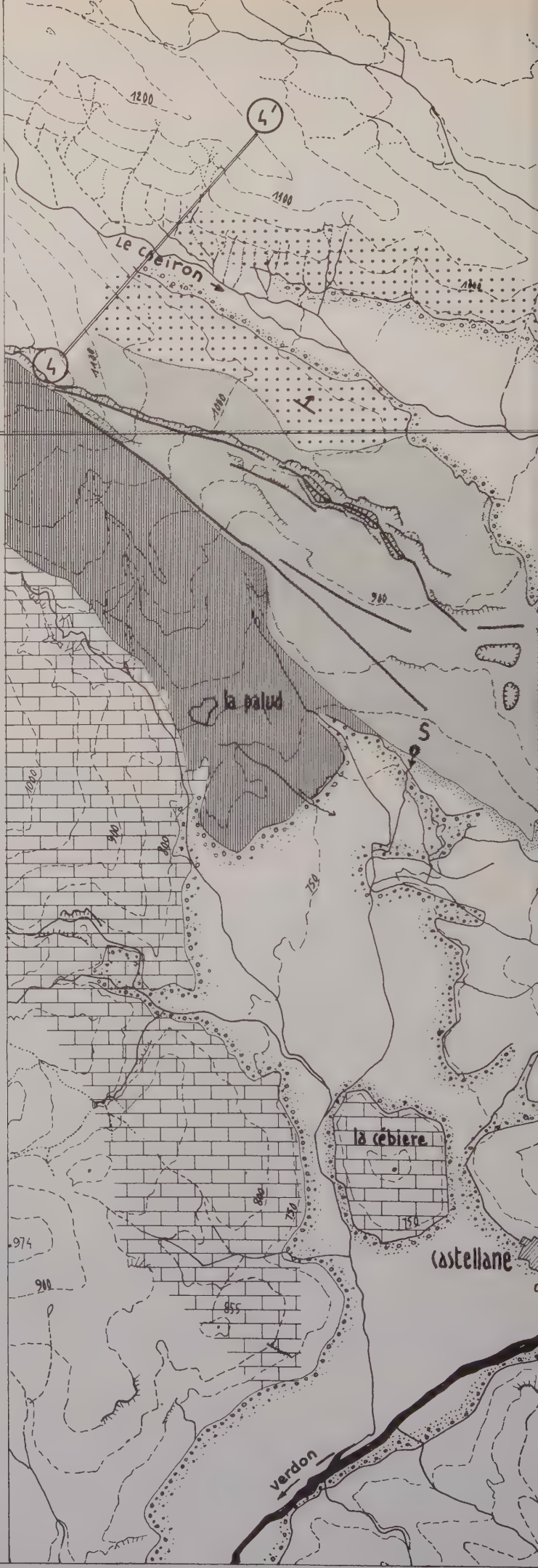
FIG 1

géologie

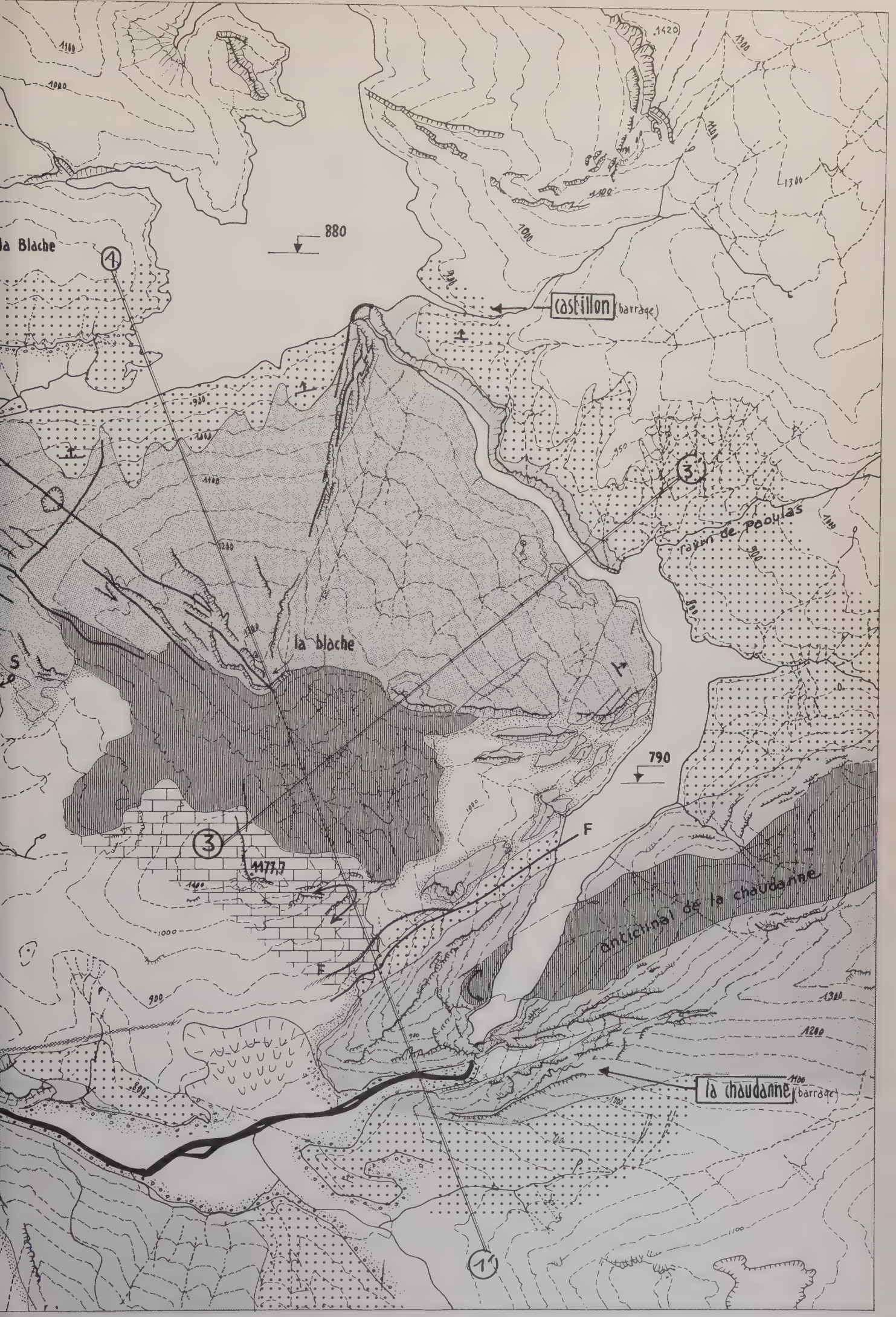


1

emplacement des coupes verticales
voir fig. 2



0 200 m. 400 600 800 1. Km


la Blache
880
castillon (barrage)
ravin de Pooylas
la blache
790
F
anticlinal de la chaudanne
la chaudanne (barrage)
1177,7

En raison de la pureté des calcaires et de l'épaisseur de la série, la karstification des formations jurassiques est nettement plus importante que celle des terrains crétacés ; ses caractères sont les suivants :

Malgré le caractère déjà montagneux de la région, le karst a échappé aux colmatages par des dépôts glaciaires, contrairement à ce que l'on observe plus au Nord (en particulier dans les ALPES du NORD et dans le JURA).

Un autre caractère spécifique et spectaculaire dans cette région est l'existence en de nombreux endroits d'importantes fissures ouvertes, parallèles aux bords des falaises ou soulignant des ruptures de pente . Le caractère karstique de ces accidents est net, mais reste cependant un caractère secondaire.

Ces fissures peuvent se poursuivre en surface sur plusieurs centaines de mètres ; en profondeur, certaines ont été explorées sur plus de 45 m de profondeur ("aven" des REGLES). Les parois sont le plus souvent anguleuses et instables (1). Les cavités résultent de toute évidence de l'écartement des parois d'une fissure initiale.

Les accidents de ce type méritent d'être signalés car ils existent sur l'appui rive droite du barrage : "faille CHADENSON", "cassure au large".

Dès le début des études, ils ont attiré l'attention des géologues qui s'occupèrent du projet [BARBIER-GIGNOUX (1955)] et qui proposèrent, pour les définir, le terme génétique de "crevasse tectonique" , l'origine de ces accidents paraissant être liée à des déformations tectoniques.

Depuis 1947, date des études du barrage de CASTILLON, les travaux géologiques régionaux ont montré la présence fréquente de ce type d'accidents : MOUSTIERS SAINTE MARIE, LES REGLES, BAUDUEN, QUINSON.

Pour certains d'entre eux, tout en étant secondaire, l'évolution karstique est suffisamment marquée pour montrer la relative ancienneté de ces accidents.

D'une manière générale, les accidents de ce type paraissent actuellement stabilisés (2). Leur localisation fréquente en bordure de falaise attire l'attention sur les phénomènes "de poussée au vide".

Du point de vue hydrogéologique, sans être véritablement d'origine karstique, ces accidents, en favorisant l'enfouissement des eaux et en désorganisant les écoulements de surface, contribuent à l'établissement d'un drainage exclusivement souterrain des masses calcaires du Jurassique supérieur.

(1) *L'exploration de ces accidents est déconseillée car dangereuse.*

(2) *Des témoins affirment cependant que, pour certains d'entre eux, une évolution visible à l'oeil nu est discernable après quelques dizaines d'années (renseignement oral).*

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. GEOLOGIE - LITHOLOGIE - MORPHOLOGIE

La morphologie complexe de la région est, en grande partie, la conséquence d'une structure géologique caractérisée par la juxtaposition de petites unités structurales et par l'existence de séries lithologiques de dureté et d'altérabilité très différentes.

- Les unités structurales

La zone intéressée (fig. 1) est occupée principalement par deux unités structurales :

1) la structure de la BLACHE,
2) l'anticlinal complexe de LA CHAUDANNE.

La coupe 1-1' (fig. 2) montre que ces deux unités sont séparées par une zone tectonisée où affleurent les marno-calcaires du Crétacé.

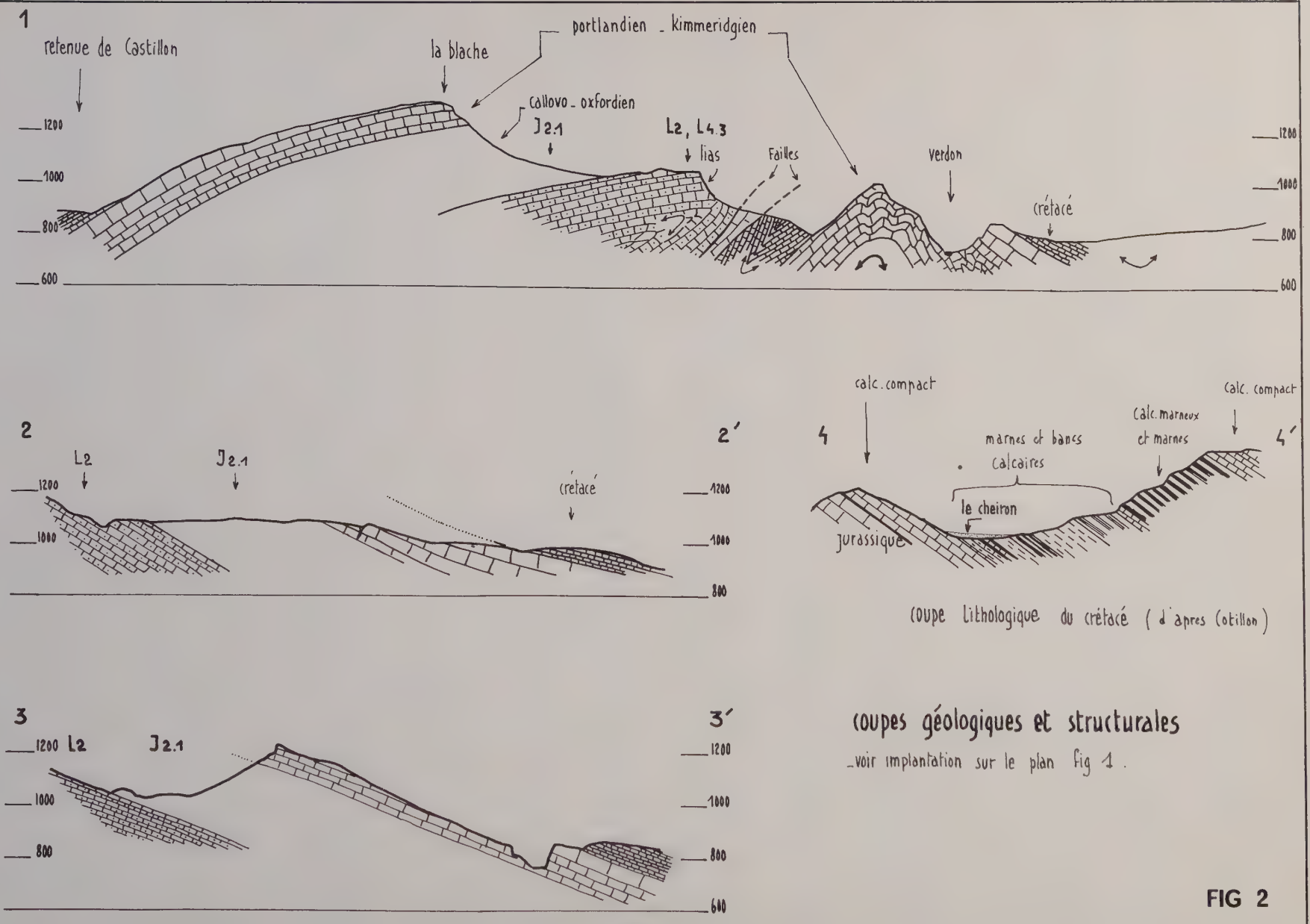
La structure de la BLACHE est un dôme anticlinal complexe déversé vers le Sud et vers l'Est ; le coeur de cet anticlinal, dont la charnière est bien visible depuis le Sud, est constitué par les calcaires du Lias. Le flanc Sud est laminé sur l'accident précédemment défini.

L'anticlinal de LA CHAUDANNE est caractérisé par sa fermeture périclinale (côté Ouest). La masse calcaire en relief est constituée par les séries du Jurassique supérieur. La dépression centrale trahit la présence des marnes du Callovo-Oxfordien. Dans le détail, la structure est très complexe. La photo 1 montre les déformations de détail du Jurassique supérieur de la rive droite, à proximité de l'appui du barrage de LA CHAUDANNE.

- Les séries lithologiques

La carte, fig. 1, et les coupes 1-1', 2-2', 3-3', 4-4' fig. 2, montrent clairement que l'on peut distinguer de haut en bas :

- les marno-calcaires crétacés dans lesquels ont été creusées la vallée du VERDON à l'amont immédiat du barrage ainsi que la vallée du CHEIRON. Ils affleurent rarement en falaises (coupe 4-4'). A sa base, au contact avec le Jurassique, le Crétacé est très calcaire et ne se différencie de ce dernier que par ses fossiles.
- les calcaires purs et massifs du Jurassique supérieur (épaisseur 150 à 180 m) ; ils forment les reliefs du paysage (photo 2) : ils affleurent en falaises, et les rivières y creusent toujours des gorges et des canyons. Ils comprennent :
  - . au sommet des calcaires sub-lithographiques du Portlandien, stratifiés en couches épaisses. Des niveaux de silex s'intercalent localement ;
  - . au-dessous, les calcaires du Kimméridgien se présentent en couches plus minces où se distinguent de fausses brèches. Des niveaux dolomitiques apparaissent à plusieurs endroits dans cette série. Les joints de stratification sont toujours très nets, leur épaisseur est de 5 à 10 cm. Ils correspondent à des passées marno-argileuses enrobant plus ou moins des fragments calcaires.



coupe lithologique du crétacé (d'après Cotillon)

coupes géologiques et structurales

_voir implantation sur le plan fig 1.

FIG 2

- les marnes gris noirâtre et les marno-calcaires schisteux du Callovo-Oxfordien (épaisseur 300 à 400 m). Ces deux faciès constituent la formation la plus meuble de toute la série sédimentaire qui intéresse le projet ; le Callovo-Oxfordien est ainsi à l'origine des combes et des dépressions.
- les calcaires roux à silex et les calcaires lités (Lias). Ces formations sont à l'origine d'une deuxième série de reliefs qui n'intéressent pas directement les retenues.

● Morphologie

Les deux caractères - structure, faciès - expliquent et se retrouvent dans la morphologie.

En première approximation,on peut considérer que, entre le barrage et la ville de CASTELLANE, le VERDON dessine un demi-cercle qui souligne les limites de l'unité de la BLACHE.

Dans le détail, apparaît une certaine complexité : à la hauteur du barrage de CASTILLON, le VERDON quitte les marno-calcaires du Crétacé pour entailler en gorge profonde les calcaires du Jurassique supérieur (photo 2). 1,5 km à l'aval du barrage, il coule à nouveau sur les marno-calcaires du Crétacé, puis quittant l'unité de la BLACHE, recoupe l'extrémité Ouest de l'anticlinal complexe de LA CHAUDANNE. Au-delà, vers l'aval, la vallée du VERDON creusée dans des terrains plus hétérogènes s'élargit, exception faite de la cluse du ROC DE CASTELLANE qui correspond au franchissement d'une barre calcaire du Jurassique supérieur appartenant à une unité située au Sud.

La grande dépression de la PALUD a été creusée dans les marnes callovo-oxfordiennes mettant en relief au Nord les calcaires du Jurassique supérieur, au Sud les calcaires du Lias.

Remarque : L'érosion des marnes, en dégageant les calcaires du Jurassique, explique la faible longueur des lignes de fuites à la hauteur du col de la BLACHE.

Au Sud de la PALUD, ces calcaires du Lias forment le rebord de la dépression marneuse, ils constituent la colline de la CEBIERE ; ils se poursuivent à l'Est de CASTELLANE jusqu'à la colline qui culmine à la cote 1177,7 (coupe 1-1').

● Fracturation

A 1'échelle du 1 : 20 000, les levers mettent en évidence l'existence très générale de réseau des cassures rectilignes qui affectent le Jurassique supérieur de l'unité de la BLACHE. Ces fractures ont été évoquées dans le paragraphe "La karstification régionale", car elles sont à l'origine des crevasses de bordure.

Dans les appuis de l'ouvrage, deux familles d'accidents peuvent être individualisées :

- un réseau parallèle à la falaise rive gauche ;
- un réseau N-S, bien visible rive gauche, auquel appartiennent les "crevasses tectoniques".

FIG 3

géologie des terrains à la cote 880 (zone A _ castillon) et à la cote 790 (zone B _ chaudanne)

éboulis _ alluvions _ quaternaire

marno _ calcaires marnes — crétacé

calcaires — jurassique supérieur

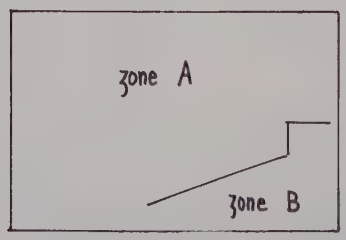
marnes — jurassique inférieur et moyen

calcaires — lias

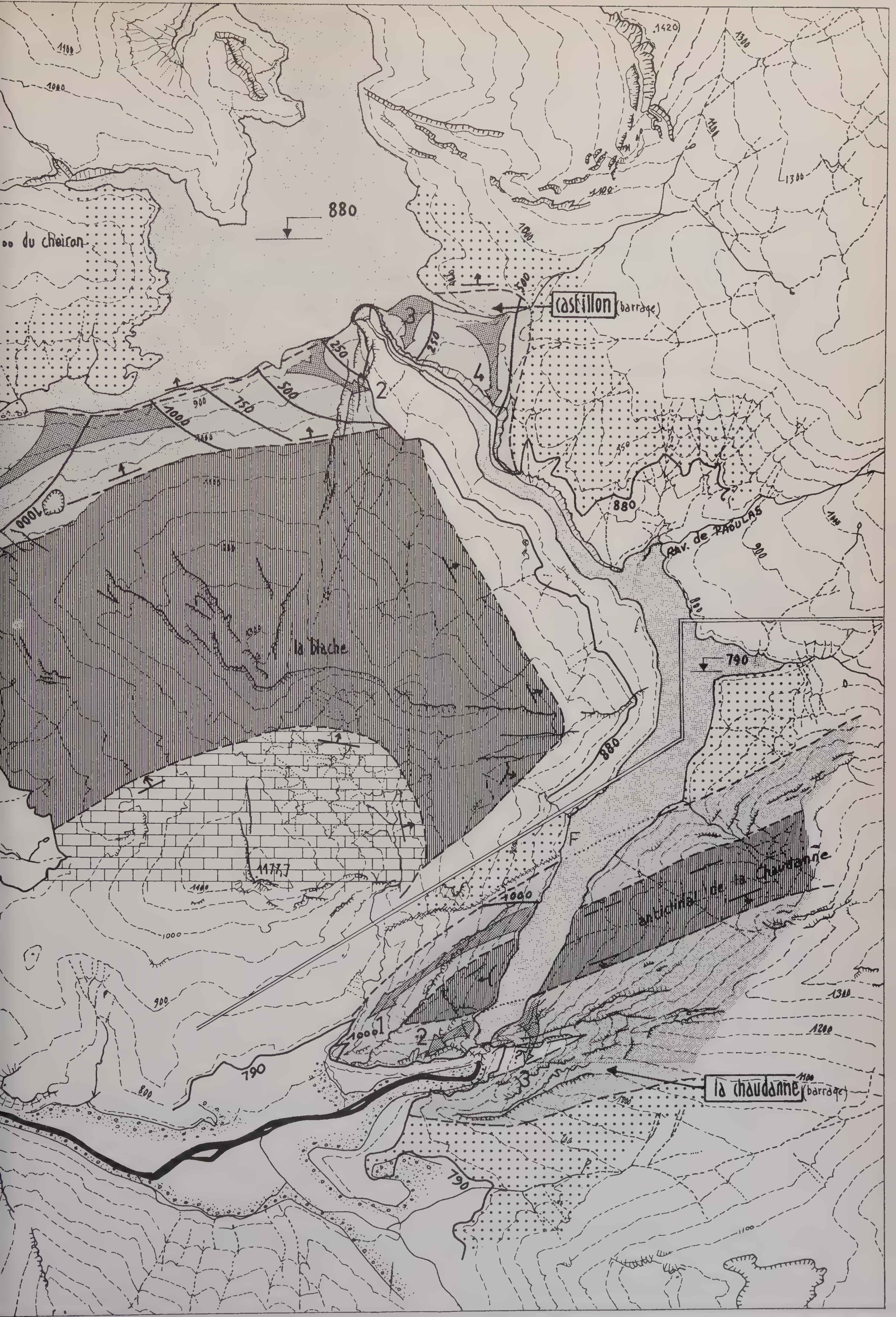
plongement des couches

cheminements possibles _ hypothèse _

1500 1250 1000 périmètre de fuite



0 200 m. 400 600 800 1. Km



880
du cheiron
castillon (barrage)
la blache
Rav. de Raoulas
790
anticlinal de la Chaudanne
la chaudanne (barrage)

L'importance de ces réseaux est liée à leur présence à proximité du barrage.

D'une manière très générale dans les unités géologiques intéressées par les retenues, la fracturation est intense. Les cassures sont le plus souvent injectées par de la calcite qui constitue une véritable trame qui peut apparaître en relief dans les roches les plus tendres (photo 3). Dans certains cas, ces remplissages peuvent être incomplets (cristaux automorphes).

2.2. LA KARSTIFICATION LOCALE

Rappelons l'existence de lapiaz bien nets sur les calcaires du Jurassique supérieur. De nombreuses dolines sont également visibles, notamment à proximité du col de la BLACHE (fig. 1). Aucune cavité importante ne peut être signalée.

2.3. HYDROGEOLOGIE

En raison du découpage tectonique des formations calcaires en unités hydrogéologiques de petite taille , le VERDON joue, en l'absence de possibilité de drainage à grande distance, le rôle de niveau de base.

Avant la mise en eau, des sources existaient déjà au contact calcaires-marnes dans la dépression de la PALUD. Le terme de source vauclusienne a même été employé par certains auteurs et l'hypothèse d'une alimentation à partir des eaux du CHEIRON a été avancée. Vérifiée, cette hypothèse aurait confirmé le caractère suspect des calcaires crétacés. Mais, en l'absence de coloration positive, le fait n'est pas évident car la surface de l'impluvium calcaire du Jurassique est suffisante pour assurer l'alimentation de ces sources.

Compte tenu de la structure géologique, le massif calcaire de la BLACHE doit également être partiellement drainé vers le VERDON. Des renseignements oraux font effectivement état de sources situées dans les gorges; ces sources étaient visibles avant la construction du barrage de LA CHAUDANNE ; actuellement, les eaux de la retenue de LA CHAUDANNE ne permettent plus de contrôler ces informations (1).

2.4. POSSIBILITES DE FUITES - CHEMINEMENTS POSSIBLES (fig. 3)

Les marnes du Callovo-Oxfordien limitent les zones suspectes. La figure 3 met en évidence les cheminements possibles et la longueur des périmètres de fuites.

Quatre cheminements peuvent être envisagés :

(1) *La durée des vidanges est généralement insuffisante pour que l'essorage des terrains dénoyés soit terminé. De plus, cette rive est en grande partie recouverte par des éboulis.*

Rive droite :

- cheminement 1 : au niveau du col de la BLACHE. Il faut noter que ce cheminement peut être court (inférieur à 800 m) si le Crétacé est perméable (1), ou plus long (supérieur à 1750 m) si le Crétacé joue le rôle d'écran. Dans cette deuxième éventualité, la pénétration de l'eau ne peut se faire que par les calcaires du Jurassique à partir de l'appui du barrage (entrée des gorges).
- cheminement 2 : ce cheminement correspond à un court-circuitage du voile et à une ressortie des eaux dans la gorge.

Rive gauche :

- cheminement 3 : contournement direct du voile par le Jurassique, émergences dans la gorge.
- cheminement 4 : circulation plus au large, dans le Jurassique et émergence dans la gorge.

3 - TRAITEMENT D'ETANCHEITE - MISE EN EAU - BILAN

● Traitement d'étanchéité

L'étanchéité à proximité du barrage a été assurée par un voile d'injection (fig. 4). Ce voile est géométriquement très dissymétrique, la rive droite ayant nécessité un traitement plus étendu et plus important que la rive gauche.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

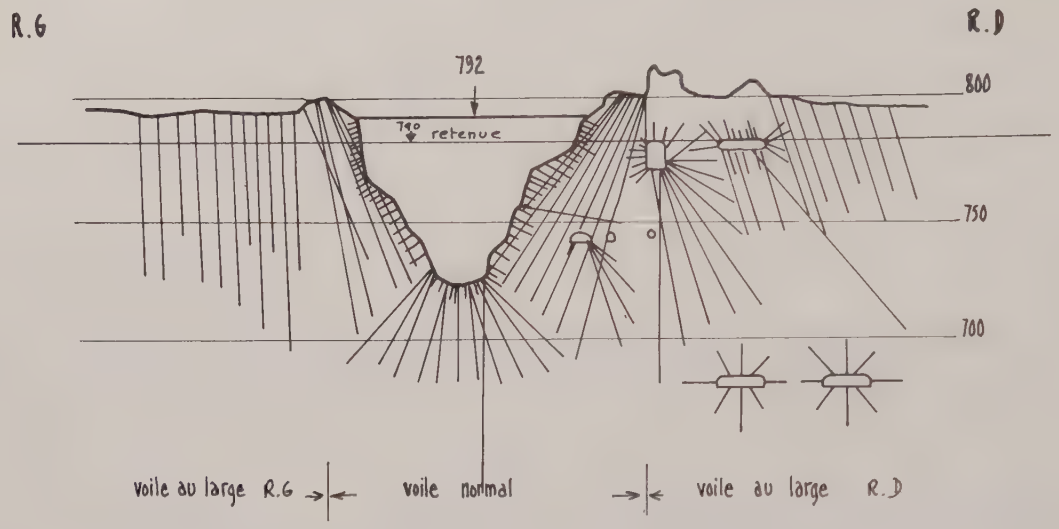
	surface totale en m2	longueur forée en m	nombre de forages	tonnage injecté	résultats quantité de coulis injecté au mètre linéaire de forage	au m2 de voile
voile au large rive droite	30.000	5.725		3205 T	560 kg	107 kg
voile latéral rive droite	3.500	712	17	190 T	265 kg	54 kg
fond de vallée	4.500	1.515	28	332 T	219 kg	74 kg
voile latéral rive gauche	2.000	715		81,5 T	115 kg	41 kg
voile au large rive gauche (*)	6.000	2.195		1220 T	555 kg	200 kg

(*) en partie réalisé après la mise en eau (il y avait fuite).

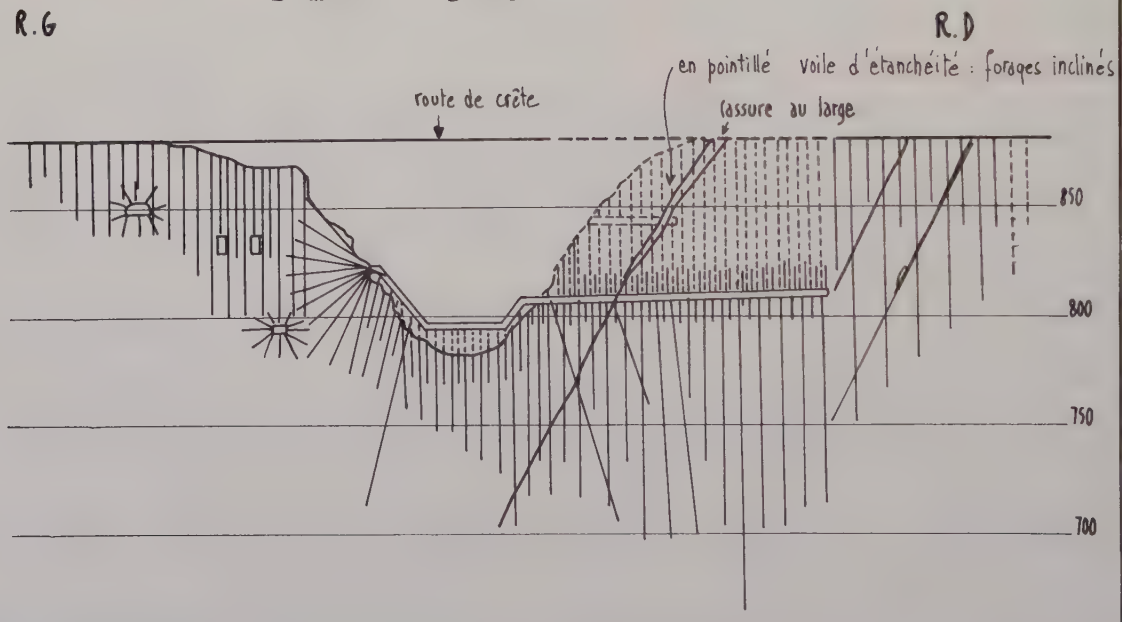
(1) *La coupe 4-4' montre que la perméabilité de la base de la série (rive droite du CHEIRON) est fort probable (fig. 2).*

FIG 4

la chaudanne – voile –



– castillon – voile



Par la suite, entre 1966 et 1969, le système de drainage a été complété sur les deux rives.

Enfin, il faut rappeler que, rive droite, un volume de 200.000 m3 de rocher a été consolidé par injection ce qui a amélioré l'étanchéité de cette zone.

● Mise en eau - Bilan

Avant la mise en eau, toutes les sources connues ont été jaugées. Les sources du col de la BLACHE ont été, en particulier, observées pendant plusieurs années.

Durant la mise en eau, des tournées quotidiennes étaient effectuées pour jauger les sources connues et déceler, le cas échéant, les nouvelles émergences.

La mise en eau :
En 1948 : mise en eau partielle
- les sources aux abords de l'ouvrage ne réagissent pas.
- une fuite de 10 l/s est observée rive gauche lorsque la cote du plan d'eau atteint 830. A cette date, le voile n'était pas terminé. Après réalisation de la totalité du voile, le débit tombe à 1 l/s.
- dans les galeries rive droite, on recueille également 1 l/s.

En 1949 : mise en eau jusqu'à la cote maximum (880)
- jusqu'à la cote 850 : aucune fuite nouvelle.
- au-dessus de la cote 850, les débits des sources du col de la BLACHE augmentent. Les pertes maximales sont évaluées à 100 l/s.

L'importance des pertes n'a pas justifié un traitement.

°
° °

Photo R. THERO

Photo 1
LE BARRAGE DE LA CHAUDANNE
Vue générale de l'appui rive droite depuis l'amont

On remarque :
en 1 : les calcaires massifs du Portlandien, découpés en chicots par la tectonique et l'érosion
en 2 : les calcaires lités du Kimméridgien, plissés
en 3 : sous les éboulis commencent les marno-calcaires du Callovo-Oxfordien.

CHAPITRE

8

LA RETENUE DU BARRAGE DE

la Chaudanne

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Le problème de l'étanchéité

2 - Le cadre naturel

- Géologie
- Hypothèses de fuites - Cheminements possibles

3 - Travaux d'étanchement - Mise en eau - Bilan

Figures et bibliographie : voir la retenue du barrage de CASTILLON

RESUME

Le barrage voûte de la CHAUDANNE (hauteur 70 m.) est situé 4 km. à l'aval du barrage de CASTILLON.

Le barrage prend appui sur la retombée aval d'un anticlinal calcaire transversal à la vallée. Ces calcaires karstiques du Jurassique supérieur sont identiques à ceux qui constituent les appuis du barrage de CASTILLON. La structure géologique pouvait faire craindre des fuites en rive droite et en rive gauche par contournement immédiat de l'ouvrage; des fuites à moyenne distance (1.000 m. environ) pouvaient également être envisagées en rive droite. La fissuration des calcaires est intense et anarchique, en raison de la complexité de détail de la structure de l'anticlinal; elle a nécessité d'importants travaux de confortement et provoqué un spectaculaire éboulement en rive gauche durant les travaux. Dans la masse rocheuse, les filons de calcite sont extrêmement nombreux.

La karstification est peu marquée sauf sur les crêtes où de nombreuses dolines sont visibles.

L'étanchéité naturelle des appuis a été améliorée par un voile d'injection de 26.000 m^2. Les consommations de coulis ont été faibles; la plupart des accidents étaient colmatés par de l'argile. La mise en eau en 1952 n'a donné lieu à aucune fuite.

SUMMARY

The 70 metres high CHAUDANNE arch dam is 4 km downstream of CASTILLON dam.

It sits on the downstream limb of a limestone anticline running transverse to the valley. The karstic Upper Jurassic limestones are the same as those forming the abutments for CASTILLON dam. The geological structure indicated some risk of leakage, through the right and the left banks close to the dam. Leakage at some distance from the dam (within a radius of about 1000 m) also had to be considered on the right bank. Fissuration of the limestones is intense and haphazard because of the complexity of the detailed structures of the anticline. This called for extensive reinforcement works and caused a spectacular rock-fall on the right bank during construction. There are very many calcite veins in the rock.

Karstification is not very marked except on the ridges where a number of sink-holes can be seen.

The natural imperviousness of the abutments was improved with a 26,000 m^2 grout curtain. Grout take was low. Most cracks were filled with clay. There was no leakage when the reservoir was filled in 1952.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de LA CHAUDANNE est situé 4 km à l'aval du barrage de CASTILLON. Ces deux ouvrages sont situés dans le même contexte karstique et géologique qui sera donc supposé connu (voir chapitre 7).

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage béton voûte mince
Rayon de courbure : 56 m
Epaisseur au niveau des fondations : 10,25 m
Epaisseur en crête : 2 m
Hauteur maximale au-dessus des fondations : 70 m
Longueur en crête : 95 m
Volume : 27.000 m3

Retenue :
Niveau du plan d'eau normal : 790
Capacité : 16 x 10^6 m3

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

Comme le barrage de CASTILLON, le barrage de LA CHAUDANNE prend appui sur les calcaires purs du Jurassique supérieur qui sont entaillés en gorges étroites par le VERDON.

La continuité de ces calcaires et leur karsticité les rendent suspects; rive droite et rive gauche, des fuites pouvaient être envisagées compte tenu de la longueur réduite des cheminements possibles et de la fracturation importante des masses calcaires.

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE ET GEOLOGIE

Le barrage prend appui sur la retombée Sud de l'anticlinal complexe de LA CHAUDANNE. Le pendage des couches atteint 70° vers l'aval.

La photo n° 1 montre mieux que toute description, la complexité tectonique de détail de cette zone. La fracturation intense du Portlandien (calcaires massifs du sommet) a notamment nécessité d'importants travaux de confortement et provoqué de spectaculaires éboulements rocheux (appui rive gauche).

Photo R. THER

Photo 3
BARRAGES DE LA CHAUDANNE ET DE CASTILLON

Fracturation et injection de calcite.
Les calcaires marneux du Crétacé sont découpés par des réseaux réguliers de diaclases. Ces réseaux sont soulignés par des remplissages complets de calcite qui affleurent souvent en relief. L'épaisseur de ces remplissages ne dépasse pas 4 cm.
La photo a été prise en rive gauche du Verdon à mi-distance entre les barrages de CASTILLON et de LA CHAUDANNE.

En partant de l'amont, la retenue, longue de 4 km, se développe d'abord pendant 1,500 km, dans la gorge creusée par le VERDON dans les calcaires du Jurassique supérieur qui constituent les appuis du barrage de CASTILLON. A l'aval de cette gorge, depuis le ravin de PAOULAS jusqu'à la retombée Nord des calcaires jurassiques de l'anticlinal de LA CHAUDANNE, les eaux de la retenue baignent les formations marno-calcaires du Crétacé sur une longueur de 1,400 km environ. Plus à l'aval enfin, à proximité de l'ouvrage, la retenue se développe à nouveau dans les calcaires du Jurassique supérieur, exception faite d'une zone où affleurent les marnes callovo-oxfordiennes, qui constituent le coeur de l'anticlinal. Ces marnes sont fort mal visibles en raison des éboulis qui couvrent le versant (photo 1).

2.2. HYDROGEOLOGIE

Le VERDON peut être considéré comme le niveau de base local des circulations souterraines.

Aucune source importante n'est connue entre le barrage et la ville de CASTELLANE. Mais il faut noter l'importance de la plaine alluviale de CASTELLANE dont les matériaux alluvionnaires peuvent masquer des émergences ; par ailleurs, les masses glissées qui recouvrent rive droite le terrain en place entre CASTELLANE et le barrage (fig. 1) peuvent également dissimuler des points de restitution.

Remarque : Il faut signaler à ce sujet l'importante arrivée d'eau (1,5 m3/s) observée rive droite durant les travaux de creusement du canal de fuite (avant la mise en eau de la retenue). L'origine de ces eaux n'a, à notre connaissance, jamais été précisée.

2.3. HYPOTHESES DE FUITES - CHEMINEMENTS POSSIBLES (fig. 3)

En considérant les formations du Jurassique supérieur comme suspectes, les cheminements possibles sont les suivants :

Rive droite :

- cheminement 1 : à partir de la retombée amont de l'anticlinal, la longueur des cheminements est de 1000 m environ ;
- cheminement 2 : à partir de la retombée aval, la longueur des cheminements peut se réduire à quelques centaines de mètres (il y a contournement direct du voile).

Rive gauche : seuls des cheminements à partir de la retombée aval de l'anticlinal sont possibles (cheminement 3). Il s'agit également du contournement direct du voile.

- Problème de la faille F

La coupe 1-1', plan 2, montre clairement que la zone faillée qui sépare l'unité de la BLACHE de l'anticlinal de LA CHAUDANNE est un accident important qui a laminé le flanc Sud de l'anticlinal de la BLACHE et plus particulièrement les calcaires du Jurassique supérieur.

Cette zone broyée, mettant en contact calcaire et marno-calcaire et courcircuitant le barrage, doit, en toute logique, être considérée comme suspecte, bien qu'il s'agisse indiscutablement d'une zone de compression.

3 - TRAVAUX D'ETANCHEMENT - MISE EN EAU - BILAN

La figure 4 montre l'importance du voile réalisé : au total 4000 m de forages formant 26.000 m2 de voile.

Voile normal :
- 12.000 m2
- 1800 m de forages
- absorption : 30 kg/m2
  200 kg par mètre de forage

Voile au large rive gauche :
- 6500 m2
- 800 m de forages
- absorption : 35 kg/m2
  288 kg par mètre de forage

Voile au large rive droite :
- 7000 m2
- 1400 m de forages
- absorption : 52 kg par mètre de forage

En résumé, on constate que les consommations de coulis ont été relativement faibles. Il faut noter que la plupart des zones tectonisées ainsi que les failles et les diaclases se sont révélées colmatées par de l'argile et de la calcite.

La retenue de LA CHAUDANNE a été mise en eau en 1952. Aucune fuite n'a été signalée. Depuis cette date, le barrage n'a fait l'objet d'aucun complément de travaux intéressant l'étanchéité.

°
° °

Photo R. RIVOIRA

Photo 1
LE BARRAGE DE CANELLES
Vue générale du barrage depuis l'aval

On remarque immédiatement l'intense fissuration de la rive gauche :
en 1 : se situe l'entrée de la grotte de 800 m
en bas 2 : les entrées de l'usine souterraine
en 3 : la Capa Negra apparaît comme une vire

CHAPITRE

9

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Canelles

(Espagne)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème de l'étanchéité

2 - Le cadre naturel

3 - Traitement d'étanchéité - Mise en eau - Bilan - Travaux complémentaires

°
° °

Figure 1 : Echelle 1 : 20 000 - Géologie générale - Morphologie - Localisation des cartes partielles

Figure 2 : Echelle 1 : 2 000 - Coupe lithologique

Figure 3 : Echelle 1 : 5 000 - Géologie détaillée du site

Figure 4 : Echelle 1 : 1 000 - Galerie rive gauche - fracturation

Figure 5 : Echelle 1 : 5 000 - Grottes - Voiles 1 et 2 - Travaux d'étanchement

Figure 6 : Débit de fuites - - Coupe 1 : 1 000 avec la "capa negra" et les galeries

Photo 1 : Rive gauche

Photo 2 : Grotte des piliers

°
° °

Bibliographie :

- Documents et plans communiqués par l'E.N.H.E.R. au cours de la visite de la Division Géologie Géotechnique en 1967.

- Levers des galeries d'après les levers originaux de R. THEROND et P. PETITEVILLE Inédit - Archives - Division Géologie Géotechnique - E.D.F.

RESUME

Le barrage voûte de CANELLES (hauteur 148 m.) est construit sur la NOGUERA RIBAGORZANA, affluent de l'EBRE (ESPAGNE).

Il est situé à la sortie d'une gorge creusée par la rivière dans une série calcaire transverse à la vallée; cette série a une épaisseur supérieure à 400 m.; elle plonge à 35° vers l'amont. La fracturation est dominée par un réseau très net de grandes cassures amont-aval qui constituent le caractère le plus marquant du site.

La karstification des calcaires est très importante; en rive gauche, les galeries de reconnaissance ont rencontré de nombreuses grottes; sur cette même rive à la cote de la crête du barrage, un réseau karstique a été exploré sur plus de 800 m.

A l'amont immédiat de l'ouvrage, les eaux de la retenue mouillent les calcaires karstiques; plus à l'amont, les formations plus marneuses qui recouvrent en concordance les calcaires interdisent toute infiltration.

En raison de la structure géologique, des cheminements pouvaient être envisagés R.D. et R.G. avec résurgence des eaux infiltrées à l'aval immédiat du barrage. Le voile d'injection a été raccordé à un niveau plus marneux de 25 m. de puissance (LA CAPA NEGRA) interstratifié dans le tiers inférieur de la série calcaire.

La mise en eau en 1958 devait s'accompagner de fuites importantes en rive gauche. Dès le début de la mise en eau, les premières fuites apparurent en rive gauche à proximité de la centrale souterraine. Le débit atteignit 1.600 l/s pour un plan d'eau à + 75 m. La montée du plan d'eau au-dessus de cette cote provoqua des débourrages importants. Pour la cote + 85 m., les débits de fuites atteignirent 8 m³/s., interdisant la poursuite du remplissage. L'importance de ces fuites devait motiver des travaux d'étanchement considérables.

SUMMARY

The 148 metres high CANELLES arch dam is built in SPAIN on the NOGUERA RIBAGORZANA, a tributary to the EBRO.

It lies at the exit of a gorge cut by the river through a limestone series more than 400 m thick running transverse to the valley and dipping 35° upstream. A very marked system of large upstream-downstream cracks predominates the fracturation system and forms the most salient features of the site.

There is extensive karstification in the limestones. On the left bank, the exploratory adits found a great number of caves;on the same bank, a network has been explored over more than 800 m of length at the level of the crest of the dam.

Immediately upstream of the dam, the karstic limestones are in contact with the reservoir water, but further upstream, the more marly formations lying conformably over the limestones prevent any infiltration.

Because of the geological structure, there was a possibility of leakage paths existing on the right and left banks with the water re-emerging immediately downstream of the dam. The grout curtain was extended down to a more marly layer 25 m thick (the CAPA NEGRA) interbedded with the lower third of the limestone series.

The reservoir was filled in 1958 and major leakage appeared on the left bank; as soon as the upstream level started to rise, the first leaks appeared on the left bank near the underground powerstation. The seepage rate was as high as 1600 l/s with a lake level at + 75 m. When it rose above this, there were large decloggings in the karst systems.. With the reservoir at level + 85 m, leakage increased up to 8 m3/s and prevented the filling operation continuing. Because of this large losses, major remedial works had to be carried out.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de CANELLES, construit par l'E.N.H.E.R. (1) sur la NOGUERA RIBAGORZANA, affluent de l'EBRE, est l'un des plus hauts barrages réalisés en pays calcaire karstique. Etudié dès 1935, puis à nouveau en 1950-51, il a été terminé en 1961.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage voûte
Hauteur : 148 m - Cote de la fondation : 370
Cote de la crête : 508
Niveau maximum de remplissage : 506
Longueur en crête : 210 m
Volume de béton : 333.000 m3
Capacité de la retenue : totale : 678 10^6 m3
capacité utile : 543 10^6 m3
Bassin versant amont : 1682 km2

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

Le barrage de CANELLES est édifié dans une gorge profonde creusée par l'érosion fluviatile dans une puissante série calcaire inclinée à 35° vers l'amont.

Les nombreuses fractures parallèles à la gorge, la karstification très évoluée du massif, la hauteur de l'ouvrage et la capacité considérable de la retenue envisagée (obstacle à des vidanges rapides et fréquentes) posaient un important problème d'étanchéité. Par contre, l'existence sous les calcaires à une profondeur acceptable de marnes étanches, et la présence au toit des calcaires de terrains imperméables limitant les zones d'infiltration, permettaient au projeteur d'envisager des solutions capables de remédier à une perméabilité excessive des calcaires karstiques.

(1) *Entreprise Nationale Hydroélectrique du RIBAGORZANA.*

FIG 1
506
NOGUERA RIBAGORZANA
20°
40°
BARRAGE
LIMITES DE LA CARTE FIGURE 3
△ 750
506
AXE ANTICLI
NOGUERA RIBAGORZANA
N
E
S
PLAN DE SITUATION GÉOLOGIQUE
0 400m. 800m.
FALAISE
PENDAGE DES COUCHES EN DEGRÉS
MARNES ÉTANCHES CRÉTACÉ INFÉRIEUR
MARNES ET CALCAIRES LACUSTRES NON KARSTIQUES
FAILLES OU FRACTURES

2 - LE CADRE NATUREL

L'ouvrage (fig. 1 et photo 1) est édifié à la sortie aval d'une gorge profonde longue de 800 m environ (1). La rivière coule à la cote 376. La crête calcaire qui domine les gorges culmine à plus de 750 m d'altitude. Malgré sa hauteur, le barrage reste donc dominé par de puissantes falaises de plus de 100 m de haut.

La gorge (fig. 2) correspond au franchissement par la rivière d'une série calcaire inclinée de 45° à 25° vers l'amont. A l'amont des gorges, la rivière a creusé son lit dans les formations plus tendres qui recouvrent les calcaires ; la vallée est alors beaucoup plus large.

A l'amont de l'entrée des gorges, la RIBAGORZANA reçoit rive droite un affluent. Cet affluent et le changement de direction de la rivière donnent à la retenue une forme en T bien visible sur la fig. 1.

2.1. GEOLOGIE

- Schéma structural

Les calcaires qui constituent les appuis du barrage appartiennent à la retombée Nord d'un anticlinal à coeur triasique dont l'axe est orienté WNW-ESE.

La coupe (fig. 2) met en évidence la diminution du pendage des couches quand on s'éloigne de l'axe de l'anticlinal : cette variation est importante, les mesures donnent : 80° au coeur de l'anticlinal,
45° à la sortie (aval) des gorges,
20° à l'entrée (amont) des gorges,

soit 60° de diminution du centre vers l'extérieur. Les couches présentent donc une concavité tournée vers le haut. Cette structure suggère une orogénèse liée à une remontée des formations triasiques qui constituent le coeur de l'anticlinal.

Si la structure générale est très simple, dans le détail, des plis secondaires, des laminages de couches, etc., perturbent la régularité des couches.

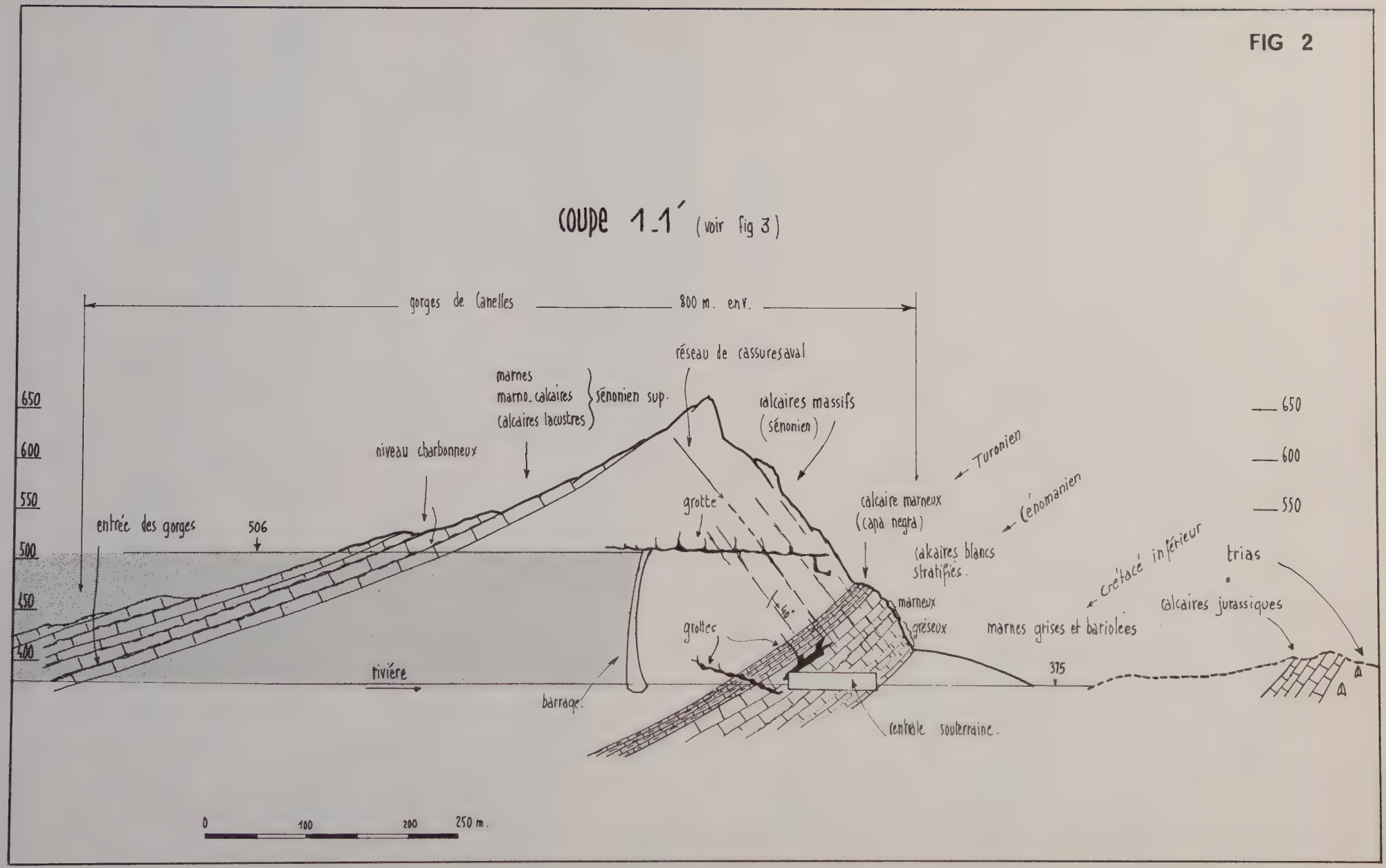
Entre la rive droite et la rive gauche de la gorge, on remarque également une variation régulière de la direction des couches, qui peut atteindre 15°.

- Lithologie

La coupe (fig. 2) présente les principaux faciès qui jouent un rôle dans l'étanchéité de la retenue.

(1) *La localisation du barrage à la sortie aval de la gorge a été choisie par le projeteur afin d'être en mesure de raccorder le voile d'étanchéité aux formations marneuses qui existent sous les calcaires. En raison du pendage amont des couches, ces marnes deviennent économiquement inaccessibles par sondages pour un ouvrage situé plus en amont.*

FIG 2


coupe 1-1' (voir fig 3)
gorges de Canelles
800 m. env.
réseau de cassures aval
marnes
marno-calcaires
calcaires lacustres
sénonien sup.
calcaires massifs
(sénonien)
niveau charbonneux
Turonien
Cénomanien
grotte
calcaire marneux
(capa negra)
calcaires blancs
stratifiés.
entrée des gorges
506
650
600
550
500
450
400
marneux
gréseux
grottes
marnes grises et bariolées
crétacé inférieur
Trias
calcaires jurassiques
375
rivière
barrage.
centrale souterraine.
0
100
200
250 m.

1. Au-dessus des marnes et des évaporites du trias, qui constituent le coeur du synclinal, le Jurassique est représenté par une série de calcaires de faible épaisseur.

2. Au-dessus de ces calcaires, les marnes du Crétacé inférieur constituent la seule formation réellement étanche de toute la série de la gorge.

3. Ces marnes sont surmontées à leur tour par les calcaires gréseux et les calcaires blancs lités du Cénomanien.

4. Au-dessus, le Turonien est représenté par 25 m environ de calcaires marneux de couleur sombre (la CAPA NEGRA). Cette série, intercalée entre deux puissantes formations calcaires, est bien visible dans la morphologie en raison de l'altération en surface de ces calcaires marneux ; dans les excavations, par contre, (fouilles, galeries), ils se distinguent moins nettement des formations plus calcaires.

5. Au-dessus du Turonien, se développe la puissante série calcaire du Sénonien, dont l'épaisseur dépasse 250 m.

   Ces calcaires qui forment les parois de la gorge, sont stratifiés en couches épaisses à la base, en couches plus litées dans la partie supérieure.

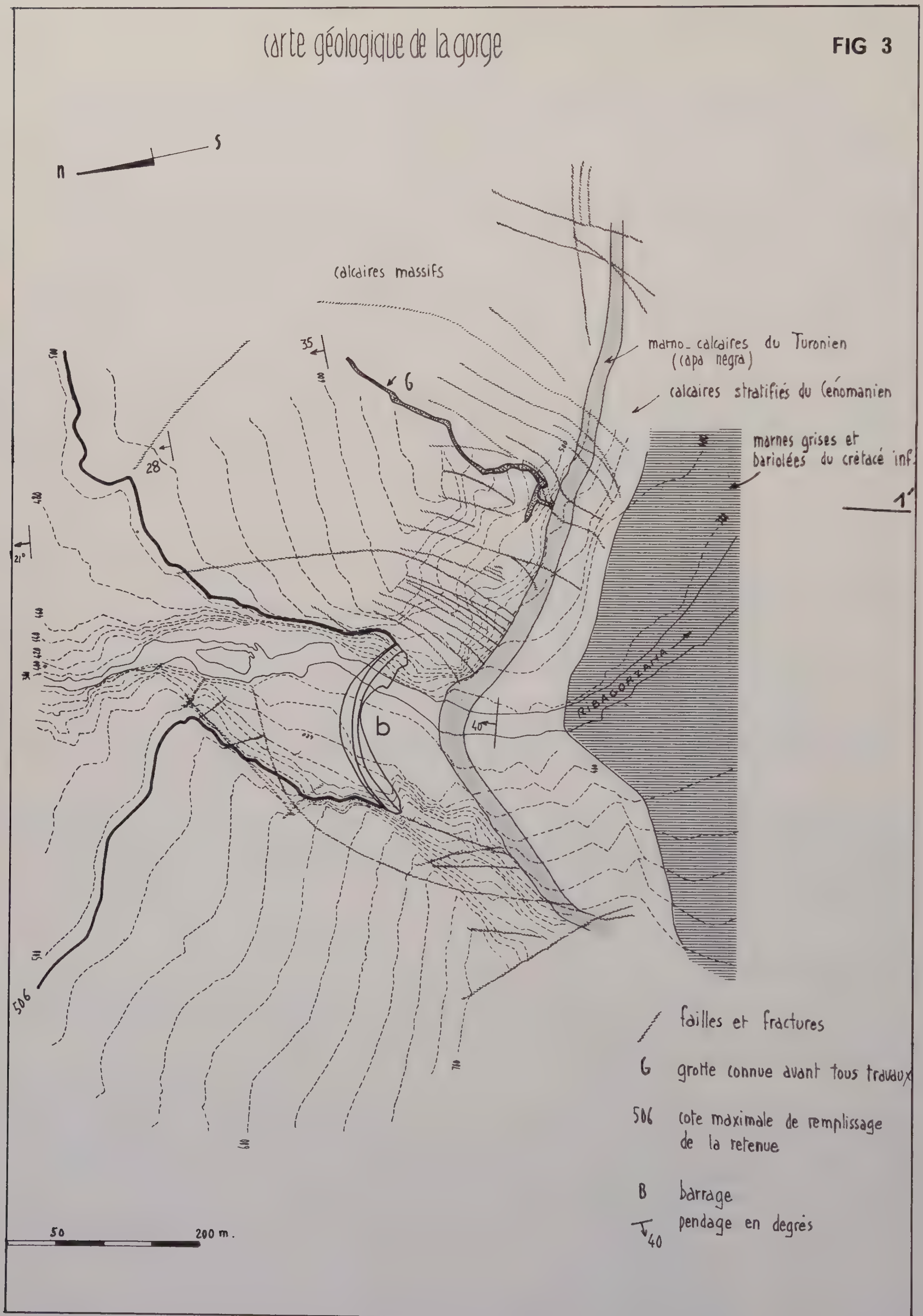
   Dans la partie sommitale de la série calcaire, des joints riches en matière organique (type lignite) sont interstratifiés entre les bancs (ex : galerie à 465, base de la descenderie).

6. Enfin, au-dessus des calcaires, se trouve, en concordance, une série comprenant des marnes, des marno-calcaires et des calcaires lacustres. Ces formations non karstiques, en protégeant les calcaires, limitent les zones d'infiltrations possibles.

● Fracturation

L'importante fracturation (fig. 3), constituée par des accidents verticaux, légèrement obliques par rapport à l'axe de la gorge, est le caractère le plus spectaculaire du site (photo 1).

Le plan (fig. 4) représente la fracturation visible rive gauche, dans la galerie d'injection située à la cote 465 et dans le Tunnel routier situé à la cote 510. Si la proximité du versant a évidemment favorisé l'ouverture et la karstification des accidents, ces galeries mettent néanmoins clairement en évidence la densité exceptionnelle du découpage. Par exemple, dans ces deux galeries, on relève (fig. 4) en moyenne une fissure importante tous les 5 m.


carte géologique de la gorge
FIG 3
n
s
calcaires massifs
35
G
28
21°
marno_calcaires du Turonien
(capa negra)
calcaires stratifiés du Cénomanien
marnes grises et
bariolées du crétacé inf.
1'
b
40
RIBAGORZANA
506
failles et fractures
G grotte connue avant tous travaux
506 cote maximale de remplissage
de la retenue
B barrage
40 pendage en degrés
50
200 m.

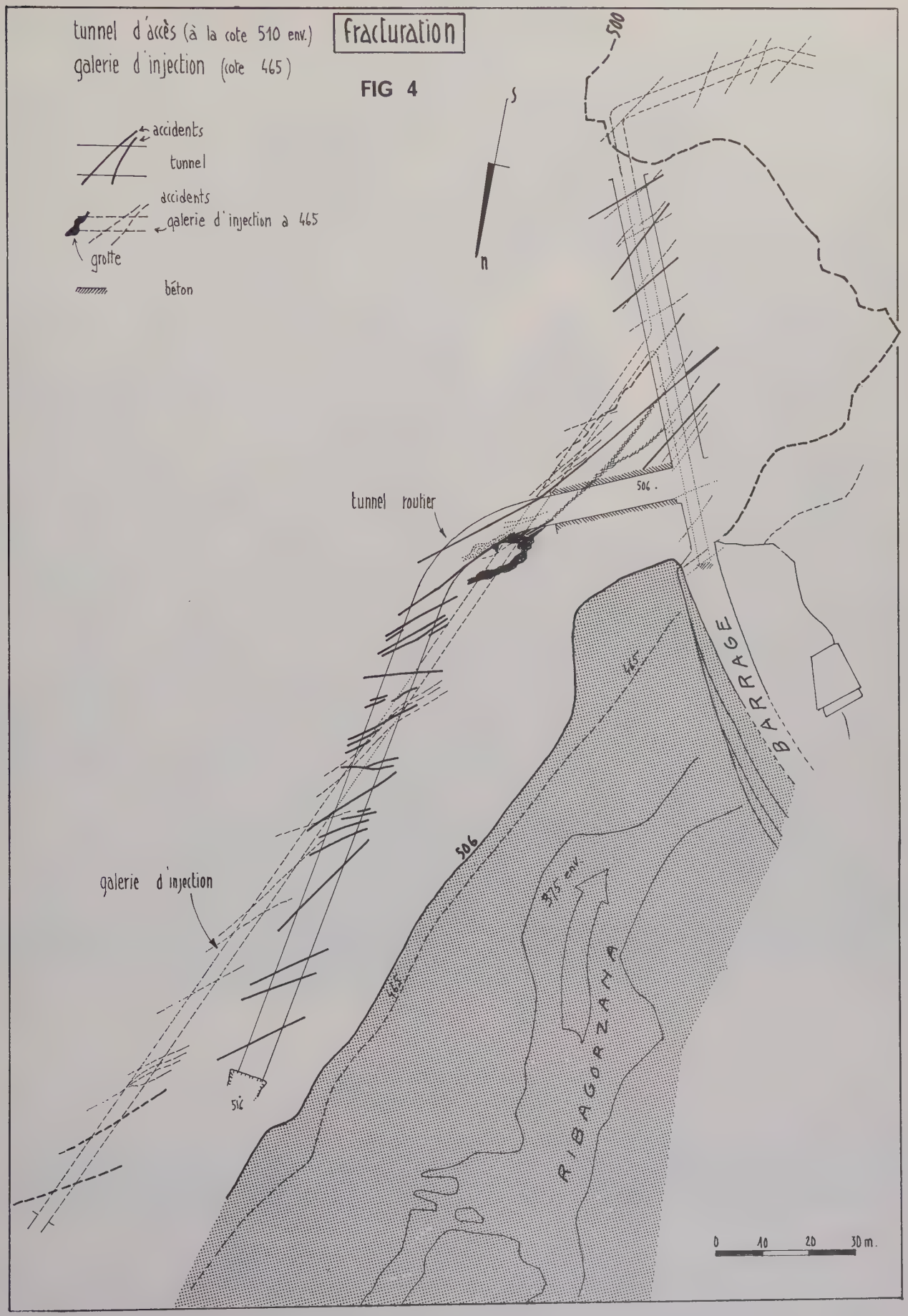

tunnel d'accès (à la cote 510 env.)
galerie d'injection (cote 465)
Fracturation
FIG 4
accidents
tunnel
accidents
galerie d'injection à 465
grotte
béton
S
n
500
506.
tunnel routier
BARRAGE
465
506
375 env
465
RIBAGORZANA
galerie d'injection
510
0 10 20 30 m.

Photo R. THER

Photo 2
LE BARRAGE DE CANELLES
Grotte des Piliers

La grotte a été creusée dans les calcaires massifs du Cénomanien de la rive gauche (voir figure 2). On distingue sur la photo le fort pendage des couches qui plongent vers l'amont à 40°. La taille considérable de la cavité a nécessité des travaux confortatifs importants bien visibles sur la photo. Il a fallu édifier de véritables murs de bétons de plus d'un mètre d'épaisseur pour assurer la stabilité des dalles calcaires qui constituent la voûte de la cavité.

Ces cassures particulièrement nettes dans les calcaires sénoniens, sont encore visibles dans les calcaires marneux du Turonien. Les principaux accidents se poursuivent également dans les calcaires du Cénomanien, soit au total sur plus de 350 m de hauteur.

Si la plupart de ces accidents sont des fractures sans rejet ou à faible rejet (inférieur à un mètre), les principaux sont de véritables failles dont le rejet peut atteindre 20 m.

Ces failles, espacées d'une centaine de mètres, divisent la masse rocheuse en panneaux. Le rejet de ces accidents s'atténue quand on s'éloigne de l'axe de l'anticlinal, pour devenir pratiquement nul à l'amont des gorges dans les formations du Sénonien supérieur. Ces accidents paraissent donc liés à la mise en place de l'anticlinal.

Un deuxième réseau de cassures, moins visible, découpe la masse calcaire. Les cassures de ce réseau sont sensiblement perpendiculaires à la gorge et plongent de 45° vers l'aval. Elles sont donc symétriques de la stratification par rapport à un plan vertical perpendiculaire à la gorge (fig. 2 : réseau de cassures aval).

2.2. LA KARSTIFICATION

La karstification se développe dans toute la série calcaire allant du Cénomanien au Sénonien, soit sur plus de 400 m de puissance. La première formation non karstique est représentée par les calcaires gréseux du Cénomanien.

La karstification a été favorisée par l'important découpage du rocher, par la puissance de la série et la pureté des calcaires. Le karst est un exemple typique de karst de fissures.

L'indice karstique le plus spectaculaire est la grotte qui s'ouvre rive gauche à la cote 480-500. Ce réseau, pénétrable sur 800 m (fig. 3), se développe parallèlement à la gorge et correspond à l'élargissement d'une faille importante. La largeur de la cavité dépasse en de nombreux endroits 10 m ; la hauteur de la voûte (toujours inaccessible) est le plus souvent supérieure à 20 m. Le concrétionnement est important (comme dans la plupart des réseaux de fissures).La progression se fait sur un remplissage d'argile et de blocs qui ne permet pas de localiser le rocher en place.

Les travaux au rocher devaient d'ailleurs confirmer l'importance de la karstification.

A partir de la centrale souterraine, plusieurs grottes (cueva de la central, cueva nueva) ont été découvertes et explorées.

A partir de la centrale en direction de la rivière, de grandes cavités de plusieurs centaines de m3 de volume, en grande partie remplies d'argile et de blocs éboulés, ont également été découvertes. Elles nécessitèrent des travaux confortatifs importants (photo 2).

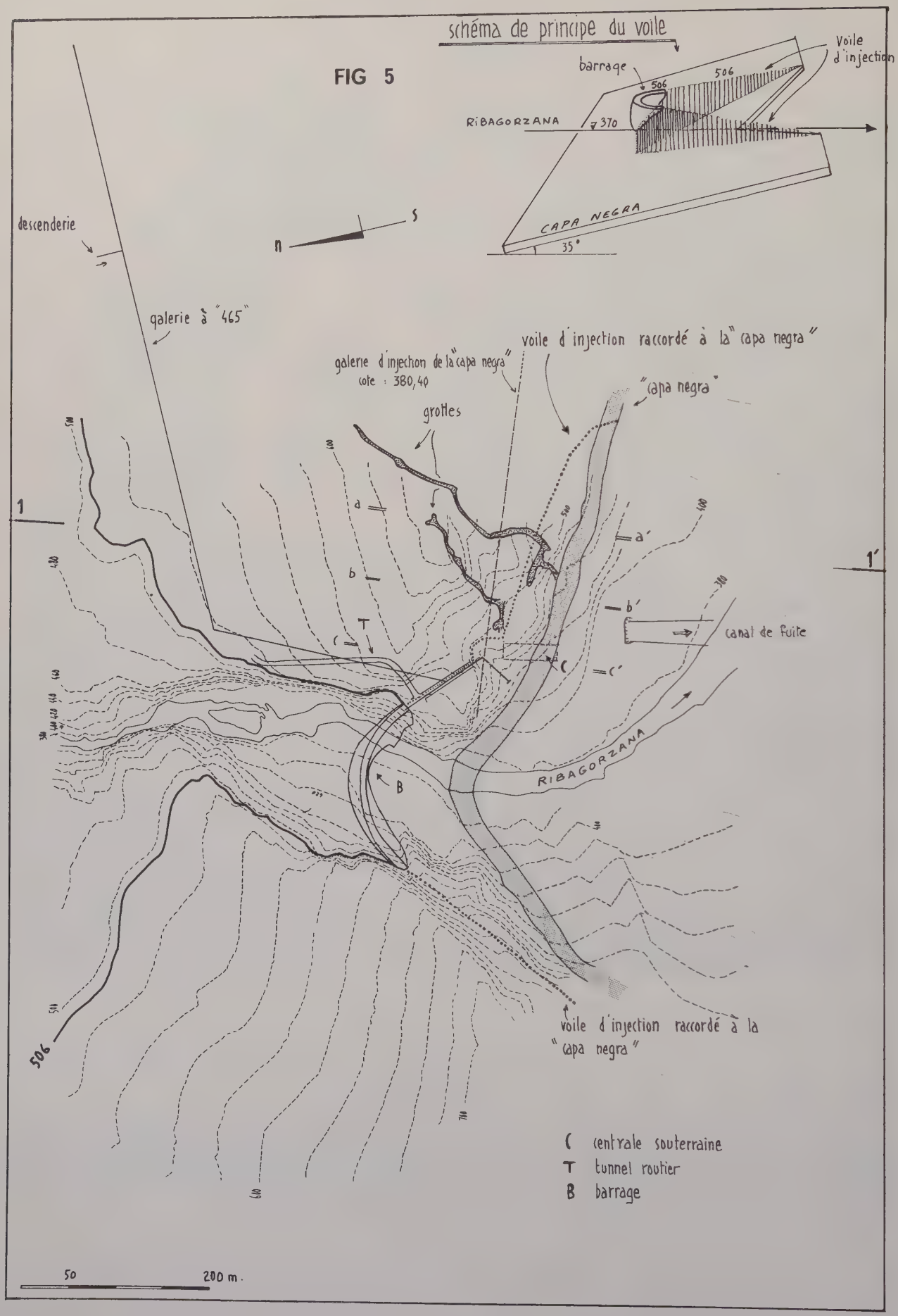


schéma de principe du voile
FIG 5
barrage
506
506
Voile d'injection
RIBAGORZANA
370
CAPA NEGRA
35°
N
S
descenderie
galerie à "465"
galerie d'injection de la "capa negra"
cote : 380,40
voile d'injection raccordé à la "capa negra"
"capa negra"
grottes
1
1'
a
a'
b
b'
c
c'
T
B
canal de fuite
RIBAGORZANA
506
voile d'injection raccordé à la "capa negra"
C centrale souterraine
T tunnel routier
B barrage
50
200 m.

Enfin, le creusement des galeries de reconnaissance et des tunnels d'accès devait révéler l'existence de nombreuses cavités karstiques, colmatées ou non ; certaines d'entre elles étaient même pénétrables sur plusieurs dizaines de mètres.

Le pourcentage de vides, calculé à partir des levers de galerie (fig. 4) est de 5 % environ.

Dans la partie supérieure des calcaires sénoniens, on remarque la présence assez fréquente de conduits d'interstrates, de petite taille ; ces conduits sont, dans leur très grande majorité, impénétrables.

Il faut noter que tous les indices karstiques, signalés dans les pages précédentes, sont situés sur la rive gauche. Il est cependant évident que la rive droite, constituée par les mêmes calcaires, n'a pu échapper à la karstification. Il est néanmoins possible que sur cette rive, la karstification soit moins prononcée que sur la rive gauche, en raison de l'orientation des cassures par rapport à la gorge.

Enfin, compte tenu de la hauteur et de la verticalité des parois, les phénomènes de poussées au vide ont participé à l'ouverture des fissures à proximité des versants.

2.3. HYDROGEOLOGIE

La RIBAGORZANA constitue dans la gorge et à l'amont de celle-ci le niveau de base des circulations souterraines en raison de la présence des marnes cénomaniennes qui forment, à la sortie de la gorge, un écran étanche transverse à la vallée.

L'impluvium calcaire drainé vers la gorge par les réseaux karstiques, peut être évalué à plusieurs km2 sur chacune des rives. Les débits correspondants devraient donc dépasser plusieurs dizaines de litres/seconde. Dans la gorge, de nombreuses fissures doivent être le point d'arrivée de circulations souterraines.

Rive gauche, à la sortie des gorges, des sources étaient connues (renseignement oral) avant la construction de l'ouvrage.

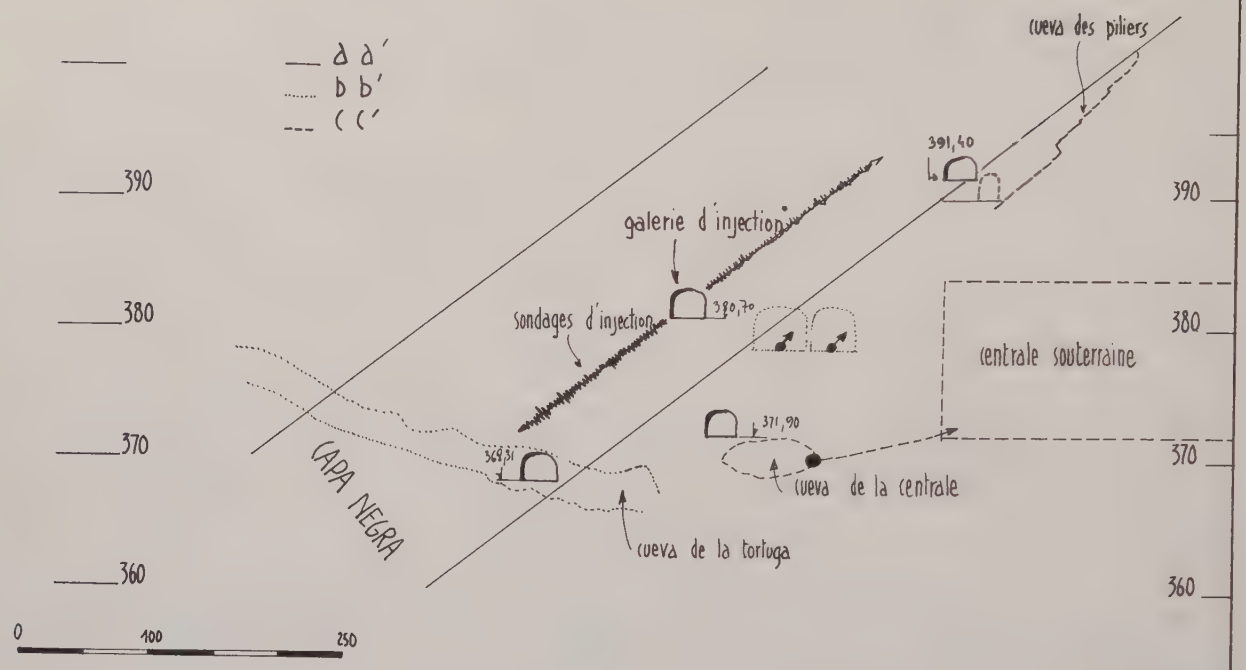
3 - TRAITEMENT D'ETANCHEITE - MISE EN EAU - BILAN - TRAVAUX COMPLEMENTAIRES

- Traitement d'étanchéité

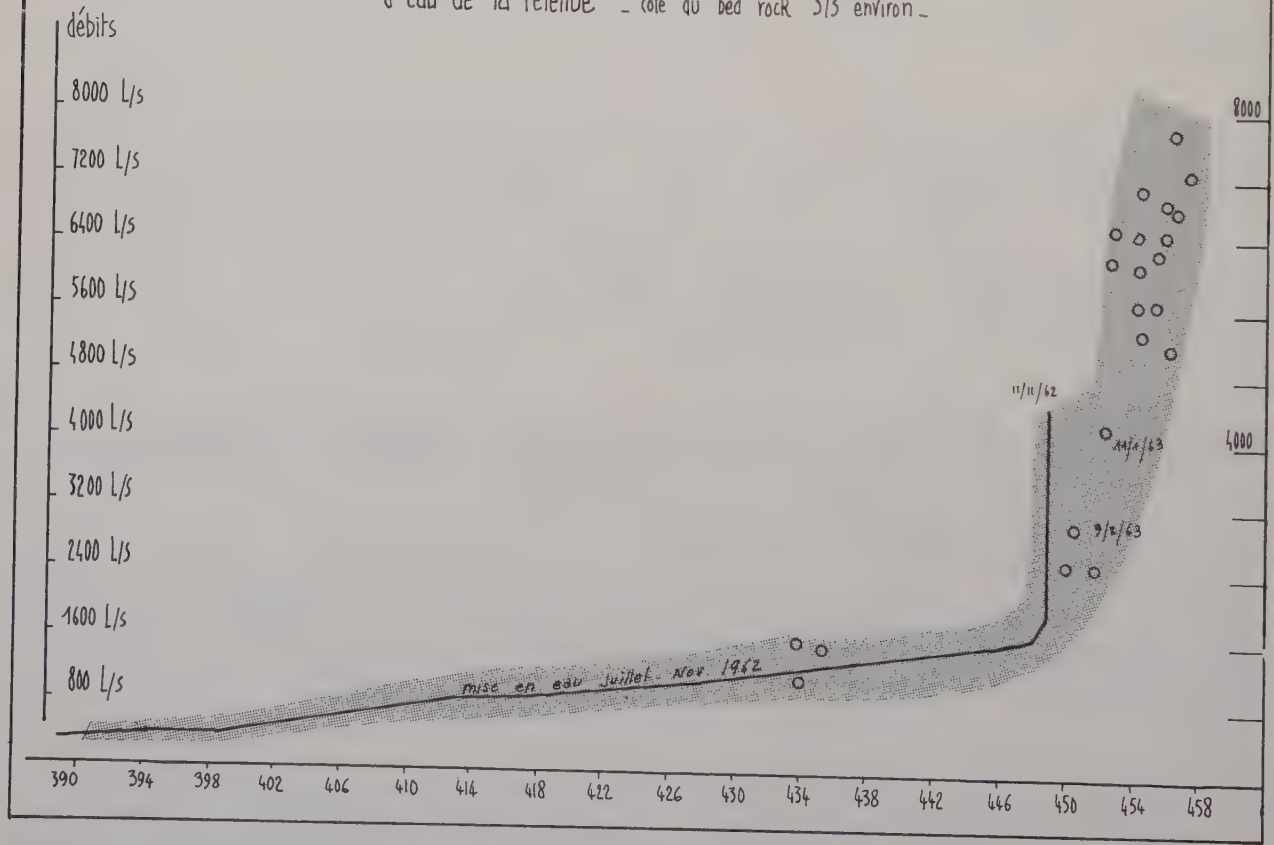
Le principe retenu pour assurer l'étanchéité de la retenue était de réaliser un voile d'injection dans les calcaires sénoniens, raccordé aux calcaires marneux de la capa negra (fig. 5).

FIG 6

projection sur un même plan des coupes aa' bb' cc' perpendiculaires à la capa negra _ implantation fig. 5



Variations des débits de fuite avec la cote du plan d'eau de la retenue _ cote du bed rock 373 environ _



En raison du pendage des couches, l'ouvrage a donc été implanté le plus à l'aval possible dans le but de réduire au maximum l'importance des travaux d'injection.

Ce voile d'injection était constitué par une série de sondages verticaux, réalisés selon la topographie, à partir de la surface sur la rive gauche, ou à partir de la galerie en rive droite et localement en rive gauche. Tous ces sondages descendaient jusqu'à la CAPA NEGRA.

En raison du principe de traitement adopté et de la topographie des rives (fig. 5), le voile se développe très à l'aval de l'ouvrage et à proximité du versant, en particulier sur la rive gauche.

● Mise en eau (fig. 5 et 6)

En 1958, dès le début du remplissage de la retenue, des venues d'eau font leur apparition dans la centrale souterraine (tympan amont) en provenance de la "cueva de la central", cavité qui avait été découverte lors de l'excavation de l'usine souterraine. Ces fuites signifiaient que la CAPA NEGRA n'était pas étanche.

● Travaux complémentaires

- 1ère phase :

Les premiers travaux réalisés (nouvelles galeries, déblaiement des grottes) avaient pour but de localiser les points d'arrivée de l'eau. Ils devaient conduire à la découverte de nouvelles cavités karstiques : "cueva de la Tortuga", "cueva nueva". Les travaux d'étanchement localisés (bouchon de béton, anneau d'injection), entrepris pour maîtriser ces fuites, n'ont pas permis de juguler les arrivées d'eau qui, en général, contournaient l'obstacle par un nouveau cheminement. Ces essais confirmèrent que la "capa negra" était franchie par les eaux en plusieurs points. Ils démontrèrent également le côté aléatoire des traitements ponctuels.

Les mesures devaient par ailleurs montrer que l'eau en arrière des bouchons pouvait être à une cote supérieure à celle de la retenue, mettant en évidence l'alimentation par l'impluvium, de certaines cavités.

- 2e phase :

Pour étancher la "capa negra", une galerie d'injection a été creusée à la cote 380,70 (dans le coeur même de la "capa negra" et en direction) (fig. 6). A partir de cette galerie, des sondages ascendants et descendants, parallèles aux couches, ont été forés puis injectés pour "régénérer" les couches. Ce traitement qui nécessita la vidange de la retenue, permit de réduire les fuites sans toutefois les faire disparaître complètement.

- 3e phase :

Pour renforcer l'étanchéité, un deuxième voile d'étanchéité, situé tout à fait à l'amont en bordure de la retenue, a été entrepris. La position de la

galerie à 465 qui appartient à ce dispositif montre clairement (fig. 5) la situation de ce nouveau rideau d'injection par rapport à l'ouvrage et à la retenue.

En résumé :

Les travaux destinés à réduire les fuites se répartissent en 3 groupes, réalisés successivement :

1) les travaux ponctuels (bouchons, anneaux),
2) la régénération de la capa negra,
3) le 2e rideau situé à l'amont.

Le plan (fig. 6) montre l'évolution des débits en fonction de la hauteur du plan d'eau dans la retenue.

On constate une augmentation brutale et importante des fuites lorsque le plan d'eau atteint la cote 450. Cette variation paraît correspondre à la mise en service d'un by-pass naturel, calé à la cote 450.

On constate également l'influence des traitements d'étanchéité sur les débits de fuites.

°
° °

CHAPITRE

10

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Karaoun

(Liban)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème général de l'étanchéité

2 - Le cadre naturel régional

3 - Le cadre naturel (suite) - Le site du barrage et la cuvette

4 - Traitement d'étanchéité - Zones d'absorption et cheminements possibles

5 - Mises en eau - Bilans

°
° °

Figure 1 : Plan de situation géologique, 1 : 200 000

Figure 2 : La série stratigraphique, 1 : 5 000

Figure 3 : Carte géologique de la cuvette, 1 : 25 000

Figure 4 : Piézométrie, voile d'injection

Figure 5 : Cheminements possibles, 1 : 200 000

°
° °

Remarque : La toponymie est celle de la carte au 1 : 200 000 "carte routière et touristique du LIBAN".

Bibliographie :

- ANTOINE (1964) : Etudes géologiques pour l'aménagement du LITANI (thèse) Faculté des Sciences de l'Université de GRENOBLE, soutenue le 1er Juillet 1964.

- BARBIER, ANTOINE (1959) : Barrage de KARAOUN, rapport géologique final (étude pour le groupe français du LITANI).

- BARBIER (1958) : Barrage de KARAOUN, rapport géologique de synthèse (étude pour le groupe français du LITANI).

- DUBERTRET (1950) : Etude géologique préliminaire d'une retenue sur le LITANI (communication au 4e Congrès des Ingénieurs des Pays Arabes) - 15 pages.

- HALWANI, PETITEVILLE (1970) : Barrage de KARAOUN, étude de l'étanchéité et solutions apportées, résultats de la mise en eau (communication au Congrès du C.I.G.B., MONTREAL 1970, Q. 37, R. 58) - 10 pages.

- PETITEVILLE, RIVOIRARD, THEROND (1961) : Rapport de fin de mission (rapport interne, Electricité de France, Service Géologie).

- 1961-1967 : Documents divers, Service Géologie, Electricité de France.

°
° °

RESUME

Le barrage en enrochements de KARAOUN (60 m. de hauteur) est construit sur le LITANI qui est la principale rivière du LIBAN.

Le LITANI coule au fond d'un grand fossé tectonique occupé par une série sédimentaire en structure synclinale. Ce trait original confère au site des caractères géologiques particuliers souvent complexes. L'ouvrage est situé à l'extrémité amont d'une gorge creusée par le LITANI dans les calcaires karstiques de l'EOCENE moyen. Ces calcaires, qui constituent les appuis du barrage, occupent la partie centrale du fossé tectonique. La retenue se développe sur des formations diverses (calcaires, dolomies, marnes, marno-calcaires) plus anciennes que les calcaires karstiques.

A l'échelle régionale, la karstification est souvent spectaculaire (pertes, sources karstiques, dépressions fermées, grottes). Sur le site, elle est représentée par des formes de surface (LAPIAZ); aucune cavité pénétrable n'a été décelée. Les travaux au rocher ont révélé la présence de poches d'argile, le plus souvent situées à quelques mètres sous la surface. Dans la zone du barrage, la karstification paraît ancienne et aujourd'hui fossile. L'hydrogéologie est complexe; dans les gorges calcaires de l'éocène moyen, les eaux du LITANI alimentent les circulations souterraines. A l'amont du barrage, la présence de terrains variés et d'accidents tectoniques est à l'origine de systèmes de drainage très compartimentés.

L'étanchéité a été assurée par un voile d'injection de 120.000 m^2. Ce voile a été raccordé en R.G. et sous la rivière à des formations étanches. En R.D. par contre, la structure géologique n'a pas permis de réaliser un rideau barrant complétement les formations suspectes. Plusieurs types de fuites devaient être envisagés :

- des fuites à longue distance (très hypothétiques),
- des fuites à moyenne distance par la R.D. avec résurgence, soit dans le LITANI à l'aval du barrage, soit aux griffons des sources karstiques d'AIN ZARKA situées à 6 km. à l'aval; le bassin d'alimentation de ces sources atteint en effet des zones proches du barrage.

La mise en eau s'est achevée en 1967. Le débit des fuites a été estimé à 300 l/s. Cette estimation ne prend pas en compte les fuites qui rejoindraient directement la source d'AIN ZARKA.

°°°

SUMMARY

KARAOUN rockfill dam, 60 m high, lies on the LITANI, the LEBANON'S principal river.

It flows in a large tectonic downthrown block occupied by a sedimentary series with a syncline structure. This unusual feature gives the site some special geological characteristics that are often complex. The dam lies at the entrance of a gorge cut by the LITANI in Middle EOCENE karstic limestones. These limestones, which form the abutments for the dam, constitute the central section of the tectonic trough. The lake covers various formations - limestones, dolomites, marls, marly-limestones - that are older than the karstic limestones.

In the regional context, the karstification is often spectacular with swallow holes, karst springs, shakeholes and caves. On the site itself, it is represented by surface forms (grikes), but no cavity large enough for a man to pass has been found. Clay pockets were encountered in the rock mass during excavation, usually only a few metres below the surface. In the vicinity of the dam, the karsts seem to be old and presently fossilized. The hydrogeology is complex; in the Middle Eocene limestone gorges, the LITANI loses water to underground flows. Upstream of the dam, the variety of the rock and the tectonic fractures give rise to highly compartmentalised drainage networks.

A 120,000 m² grout curtain was realized down to impervious formations on the left bank and under the river. But on the right bank, the geological structure was such that it was impossible to grout a positive curtain completely cutting off the suspect formations. Several types of potential leakage processes had to be considered, such as leakage at considerable distance from the dam (which was very hypothetical) and leakage closer to it, through the right bank with the water emerging either in the LITANI downstream of the dam either in the karstic AIN ZARKA gushing springs 6 km farther down river, as the catchment area of these springs includes zones close to the dam.

The filling operation was completed in 1967. Leakage was estimated at 300 litres/s, although this total doesn't include eventual seepage flowing directly to the AIN ZARKA spring.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le LITANI dont la longueur est de 165 km, et le débit moyen de 15 m3/s, est la plus importante des rivières du LIBAN. Le barrage de KARAOUN, situé à 95 km de l'embouchure permet par sa capacité de 220 millions de m3, de contrôler le régime des apports annuels qui atteignent 400 millions de m3.

Les études se sont poursuivies de 1950 à 1961. Une des originalités du projet est que, en raison des aléas géologiques, l'ouvrage a été construit par surélévations successives. Ce type d'ouvrage permettait en effet au projeteur d'arrêter la construction si pour un certain niveau de remplissage, les fuites s'étaient avérées trop importantes.

La mise en eau a commencé en 1962. C'est en 1967 seulement que la cote définitive de remplissage (858) a été atteinte.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

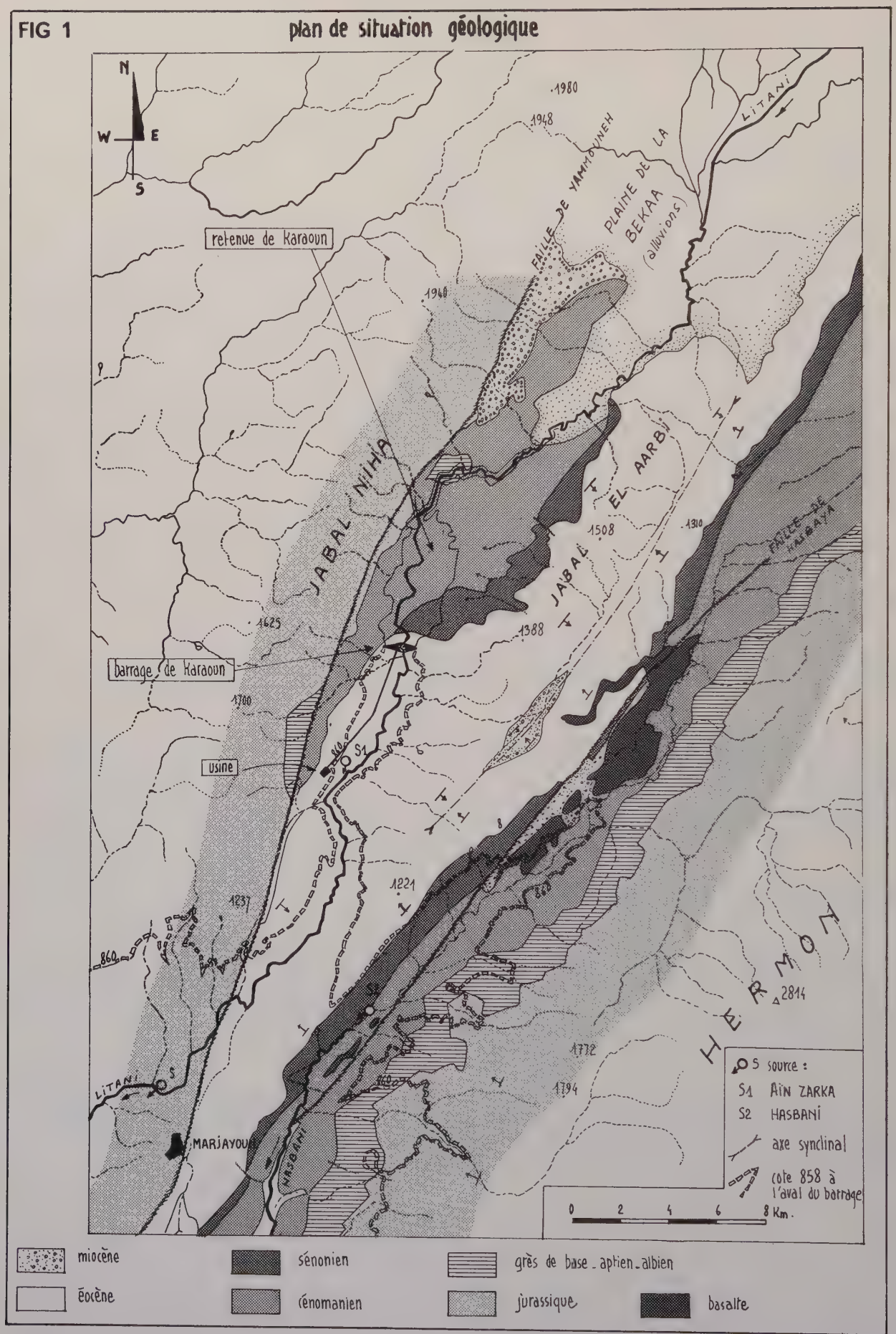
Barrage en enrochements à masque amont en béton
Etapes successives de construction : cotes { 818
{ 837
{ 858
Hauteur définitive de l'ouvrage : 60 m
Développement en crête : 1100 m
Volume de la retenue : 220.10^6 m3
Cote maximale du plan d'eau : 858
Apports annuels : 400.10^6 m3 dont 300.10^6 m3 entre le 1er novembre et le 30 avril.

● PROBLEME GENERAL DE L'ETANCHEITE

Le caractère géologique le plus original de la retenue du LITANI est qu'elle est située dans un fossé tectonique. La morphologie régionale n'est donc pas le résultat d'une érosion fluviatile, mais a été modelée en grande partie par l'orogénèse. La plupart des formations qui constituent le substratum du fossé et les massifs qui l'environnent, sont dolomitiques ou calcaires, la karstification est très nette ; elle a commencé dès le Miocène.

L'hydrogéologie karstique d'une telle région peut être en grande partie indépendante du réseau hydrographique superficiel. Il est indispensable alors de considérer le projet dans un très large contexte géographique afin de déceler l'organisation des systèmes naturels de drainage.

FIG 1


plan de situation géologique
N
W
E
S
retenue de Karaoun
barrage de Karaoun
usine
JABAL NIHA
JABAL EL AARBI
FAILLE DE YAMMOUNEH
PLAINE DE LA BEKAA (alluvions)
FAILLE DE HASBAYA
LITANI
HASBANI
MARJAYOUN
1980
1948
1940
1625
1508
1388
1310
1700
1221
1237
860
1772
1794
2814
S source :
S1 AIN ZARKA
S2 HASBANI
axe synclinal
cote 858 à l'aval du barrage
0 2 4 6 8 Km.
miocène
éocène
sénonien
cénomanien
grès de base - aptien - albien
jurassique
basalte

2 - LE CADRE NATUREL REGIONAL

2.1. MORPHOLOGIE - GEOLOGIE

La retenue du barrage de KARAOUN est située dans la plaine de la BEKAA (fig. 1). Cette plaine est la partie la plus plate du fossé tectonique. A l'Ouest, elle est limitée par le JABAL NIHA qui s'élève jusqu'à la cote 1800. A l'Est, elle s'arrête sur le JABAL EL AARBI qui culmine à la cote 1508, et dont la ligne de crête constitue la limite Est du bassin versant du LITANI. Au-delà, plus à l'Est, une dépression drainée par le NAHR HASBANI souligne une grande faille qui sépare le JABAL EL AARBI du massif de l'HERMON (2814 m).

Si, au Nord de la retenue, le LITANI coule au milieu du fossé, dans la zone du barrage, il longe la bordure Ouest, c'est-à-dire le pied du JABAL NIHA. A l'Est, le NAHR HASBANI qui longe la bordure Est du fossé, occupe dans le fossé une position symétrique de celle du LITANI.

Vers le Sud, les deux rivières se rapprochent (distance minimum 3,5 km), soulignant ainsi la convergence des deux failles qui délimitent à l'Est et à l'Ouest le fossé. Mais au Nord de la ville de MARJAYOUN, le LITANI s'échappe du fossé en obliquant vers l'Ouest tandis que le NAHR HASBANI continue vers le Sud en direction du LAC DE HOULE.

Le JABAL EL AARBI constitué par des calcaires éocènes, est le coeur de la structure synclinale qui occupe tout le fossé et dont l'axe suit au Nord la crête du JABAL EL AARBI puis vers le Sud rejoint le LITANI, avant d'atteindre la faille de YAMOUNEH au Nord de la ville de MARJAYOUN.

La coupe fig. 2 présente la lithologie de la série stratigraphique des terrains qui forment le substratum du fossé. Dans cette série, le Sénonien et le Paléocène représentent le seul ensemble qui, par sa puissance, peut être considéré comme un écran étanche à l'échelle régionale.

Si, dans le fossé, les terrains les plus anciens sont les marnes et les calcaires de l'Albien, le JABAL NIHA et l'HERMON qui l'encadrent sont des massifs constitués par des formations jurassiques : le rejet de la faille de YAMOUNEH dépasse donc 1000 m. Cette dernière est un accident complexe ; à l'amont du site de KARAOUN, les formations anté-éocènes sont encore bien représentées ; au Sud, par contre, elles disparaissent en grande partie et la faille met en contact les calcaires karstiques de l'Eocène et les calcaires dolomitiques du Jurassique.

A l'Est, entre l'HERMON et le JABAL EL AARBI, la structure géologique est plus régulière ; les différentes formations affleurent en bandes continues du Nord au Sud. Cette régularité est liée au fait que la faille de HASBAYA n'a pas l'ampleur et la brutalité de la faille à YAMOUNEH.

2.2. LE KARST ET L'HYDROGEOLOGIE REGIONALE

A l'amont du site du barrage, le LITANI est alimenté par des sources karstiques. Les principales sortent en rive droite, au pied du JABAL NIHA, le long de la faille de YAMOUNEH à la cote 950 environ. Quelques sources sortent également dans le lit de la rivière, par exemple à la hauteur du camp de KARAOUN dans les calcaires turoniens (fig. 3).

A l'aval de l'ouvrage, au-dessous de la cote 850, deux importantes sources karstiques sont connues.

En rive droite, la source d'AÏN ZARKA (fig. 1) qui est située 550 m à l'amont de l'usine, sort des calcaires éocènes. Son débit varie de 1,8 à 3,6 m3/s (renseignement verbal).

Au Sud, près de la ville de MARJAYOUN, le LITANI recoupe la faille de YAMOUNEH puis le JABAL NIHA, où il reçoit à nouveau les eaux d'une importante source alimentée par le JABAL NIHA.

A l'Est du fossé, le NAHR HASBANI qui dans sa partie Nord ne présente qu'un écoulement temporaire, devient une rivière pérenne en recevant les sources du HASBANI qui sortent rive gauche (cote 550) des calcaires cénomaniens (débit 2 à 5 m3/s) (renseignement oral). Selon toute vraisemblance, elles ramènent au NAHR HASBANI les eaux infiltrées sur le massif de l'HERMON.

La nature karstique des écoulements est également démontrée par les observations faites dans les galeries. Par exemple, la galerie MARKABI-JEZZINE a recoupé un conduit karstique qui véhiculait un débit supérieur à 450 l/s. Compte tenu des précipitations (sur les montagnes 900 à 1500 mm/an), si on évalue les débits spécifiques à 10 l/s/km2, on doit admettre que les réseaux drainants des principales sources doivent se développer à plus de 10 km de leur point d'émergence. Dans le cadre de l'étude d'une retenue, la possibilité de circulation à 10 km doit donc être envisagée.

La nature karstique de l'hydrogéologie est également confirmée par les observations de surface. Les crêtes des massifs jurassiques (calcaires et dolomies) qui encadrent le fossé de la BEKAA, sont crevées d'avens, de dépressions fermées et de puits absorbants. Les lapiaz occupent d'importantes surfaces.

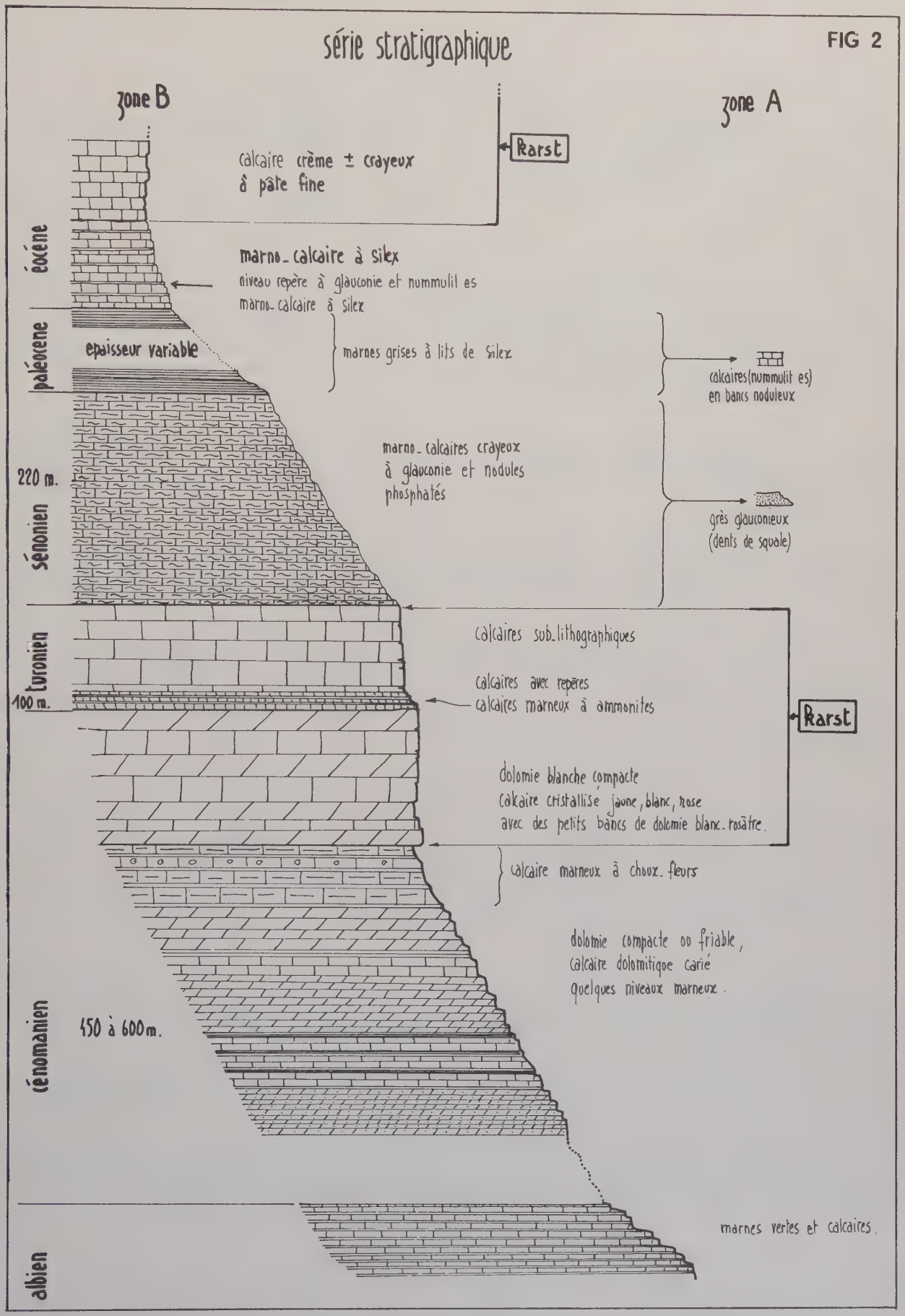
Dans la plaine de la BEKAA, et notamment dans la cuvette du barrage, le karst est moins spectaculaire ; il est masqué en partie par des dépôts alluvionnaires anciens plus ou moins remaniés.

Ces dépôts sont liés à l'histoire de la BEKAA que l'on peut résumer ainsi :

- *au début du Miocène : érosion, dépôts de poudingues et de marnes lacustres à l'amont de KARAOUN dans la BEKAA qui est à cette époque un lac ;*
- *à la fin du Miocène et au début du Pliocène : orogénèse, déformations, éruptions volcaniques, dépôts d'alluvions ;*
- *à la fin du Pliocène : dernières déformations, érosion des dépôts, mise en place du réseau hydrographique actuel.*

Les surfaces d'érosion qui se sont développées au Miocène et qui ont subi une karstification intense, ont donc été recouvertes durant le Pliocène par un tapis de dépôts qui a partiellement fossilisé le karst. A l'aval du site, les mêmes surfaces d'érosion ont été recouvertes localement par des coulées basaltiques.

On est par conséquent en présence d'un karst en partie protégé dont l'évolution a été freinée ou tout au moins modifiée par l'existence d'un tapis alluvial ou volcanique.


série stratigraphique
FIG 2
zone B
zone A
karst
calcaire crème ± crayeux
à pâte fine
éocène
marno-calcaire à silex
niveau repère à glauconie et nummulites
marno-calcaire à silex
paléocène
épaisseur variable
marnes grises à lits de silex
calcaires (nummulites)
en bancs noduleux
220 m.
sénonien
marno-calcaires crayeux
à glauconie et nodules
phosphatés
grès glauconieux
(dents de squale)
turonien
100 m.
calcaires sub-lithographiques
calcaires avec repères
calcaires marneux à ammonites
karst
dolomie blanche compacte
calcaire cristallisé jaune, blanc, rose
avec des petits bancs de dolomie blanc-rosâtre.
calcaire marneux à choux-fleurs
cénomanien
450 à 600 m.
dolomie compacte ou friable,
calcaire dolomitique carié
quelques niveaux marneux.
albien
marnes vertes et calcaires.

- Originalité du site dans le cadre régional

Le long du cours du LITANI, le site du barrage présente des caractères morphologiques et géologiques particuliers, qui ont joué un rôle dans le choix de cet emplacement pour édifier l'ouvrage.

1) C'est l'endroit où le LITANI entre dans les calcaires karstiques de l'Eocène moyen.

La vallée du LITANI qui, jusque là est large et peu encaissée, devient une gorge étroite aux parois souvent verticales. A l'amont du site, la pente moyenne de la rivière ne dépasse pas 2/1000. A l'aval, dans les calcaires éocènes, elle atteint 8,5/1000. Si, une telle pente est un facteur favorable pour projeter un aménagement hydroélectrique, elle est par contre un élément défavorable dans le problème de l'étanchéité.

Elle est supérieure en effet, à la valeur moyenne du gradient des écoulements souterrains, qui est généralement voisin de 5/1000. Dans de telles zones, le drainage souterrain aura donc tendance à s'organiser au détriment des écoulements superficiels.

2) C'est l'endroit où disparaissent les marno-calcaires du Sénonien qui constituent le seul écran dans la série et qui se développent largement au Nord du site.

La carte fig. 1 montre que, en raison de la structure synclinale, si en rive droite, à l'aval du site du barrage, les formations sénoniennes s'étaient poursuivies vers le Sud, la seule possibilité pour que la retenue perde de l'eau aurait été que des circulations s'établissent dans les formations karstiques du Turonien et du Cénomanien et, passant sous le synclinal, soient ressorties au Sud dans la vallée du NAHR HASBANI.

Mais, cette disparition du Sénonien à la hauteur du site met en contact les calcaires du Turonien mouillés par les eaux de la retenue, avec les calcaires karstiques de l'Eocène qui se développent à l'aval. Il existe donc des possibilités de circulations à proximité de l'ouvrage par la rive droite.

Une étude détaillée de cette zone de contact a été nécessaire.

3 - LE CADRE NATUREL (suite) - LE SITE DU BARRAGE ET LA CUVETTE

La carte fig. 3, au 1 : 25 000, met en évidence les principaux caractères et les principales zones morphologiques de la cuvette (au sens large).

L'encaissement en gorge de la rivière à l'aval du site apparaît nettement. A l'amont, à l'exception de quelques falaises de faible hauteur (camp de KARAOUN), la rivière n'entaille que faiblement la plaine de la BEKAA.

Du point de vue morphologique, on peut distinguer 4 zones :

1) Au NW la retombée du JABAL NIHA, caractérisée par la raideur et la régularité de la pente, mais qui n'atteint pas la cuvette.

2) A l'amont du site, une zone faiblement accidentée, occupée par la cuvette.

3) A l'aval du site, une zone tabulaire, recouverte par quelques placages de basalte et entaillée en gorge par le LITANI.

4) Entre les zones 2 et 3, une zone en relief constituée par plusieurs collines. Ce relief traverse le LITANI à l'emplacement même de l'ouvrage. En rive droite, cette zone est constituée par trois collines successives qui s'orientent peu à peu parallèlement à la faille de YAMOUNEH. Rive gauche, le relief est moins marqué et reste franchement perpendiculaire à la direction générale du LITANI. Ce bourrelet a une origine géologique, il souligne le contact Eocène-Turonien.

3.1. GEOLOGIE

● Lithologie

La coupe fig. 2, déjà citée, est une coupe synthétique, établie (sauf pour l'Albien qui n'affleure pas à proximité du site) à partir des levers de surface, effectués dans la zone du barrage et à partir des carottes des sondages de reconnaissance.

Dans ce périmètre, il a paru nécessaire de distinguer deux zones : une zone B (carte fig. 3) où tous les termes de la série sont représentés, et une zone A où le Sénonien et le Paléocène sont représentés par des séries d'épaisseur réduite.

● Perméabilité et karstification des séries

De bas en haut :

- L'Albien est imperméable.

- Le Cénomanien : les faciès du Cénomanien sont variés. A la base, les dolomies sableuses sont perméables mais par leur nature ne permettent pas une karstification avec des vides individualisés.

  Les calcaires dolomitiques cariés, et les calcaires dolomitiques présentent une karstification réduite.

  Les calcaires marneux à choux-fleurs ne sont pas karstiques mais leur épaisseur est trop faible pour qu'ils jouent le rôle d'écran étanche sauf localement.

  Au sommet, les dolomies et les calcaires représentent une puissante formation franchement karstique.

- Le Turonien : à la base, les calcaires marneux à ammonites, en raison de leur faible épaisseur, ne jouent qu'un rôle de repère stratigraphique. Au-dessus, les calcaires sub-lithographiques constituent une puissante formation franchement karstique qui caractérise le Turonien.

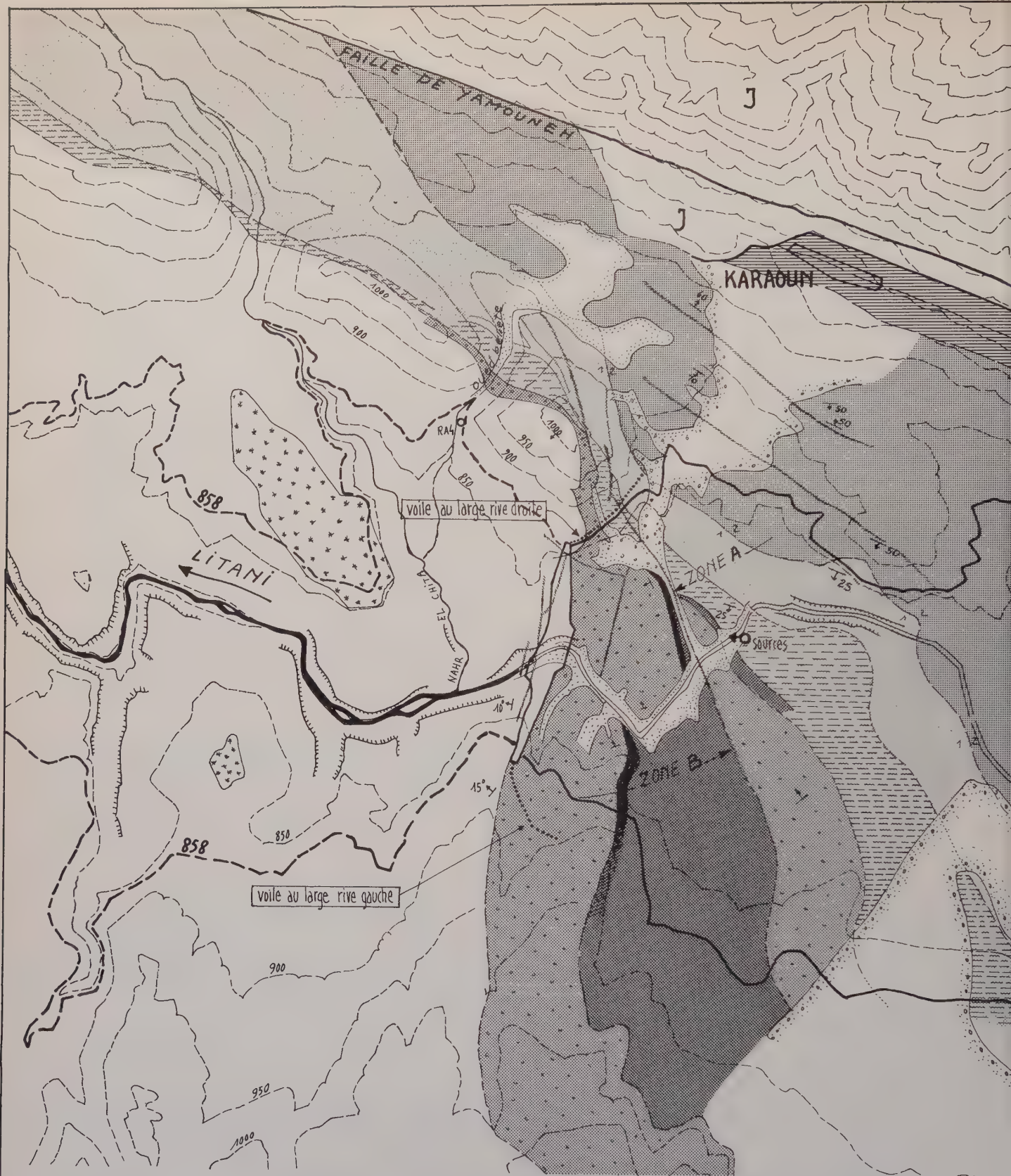
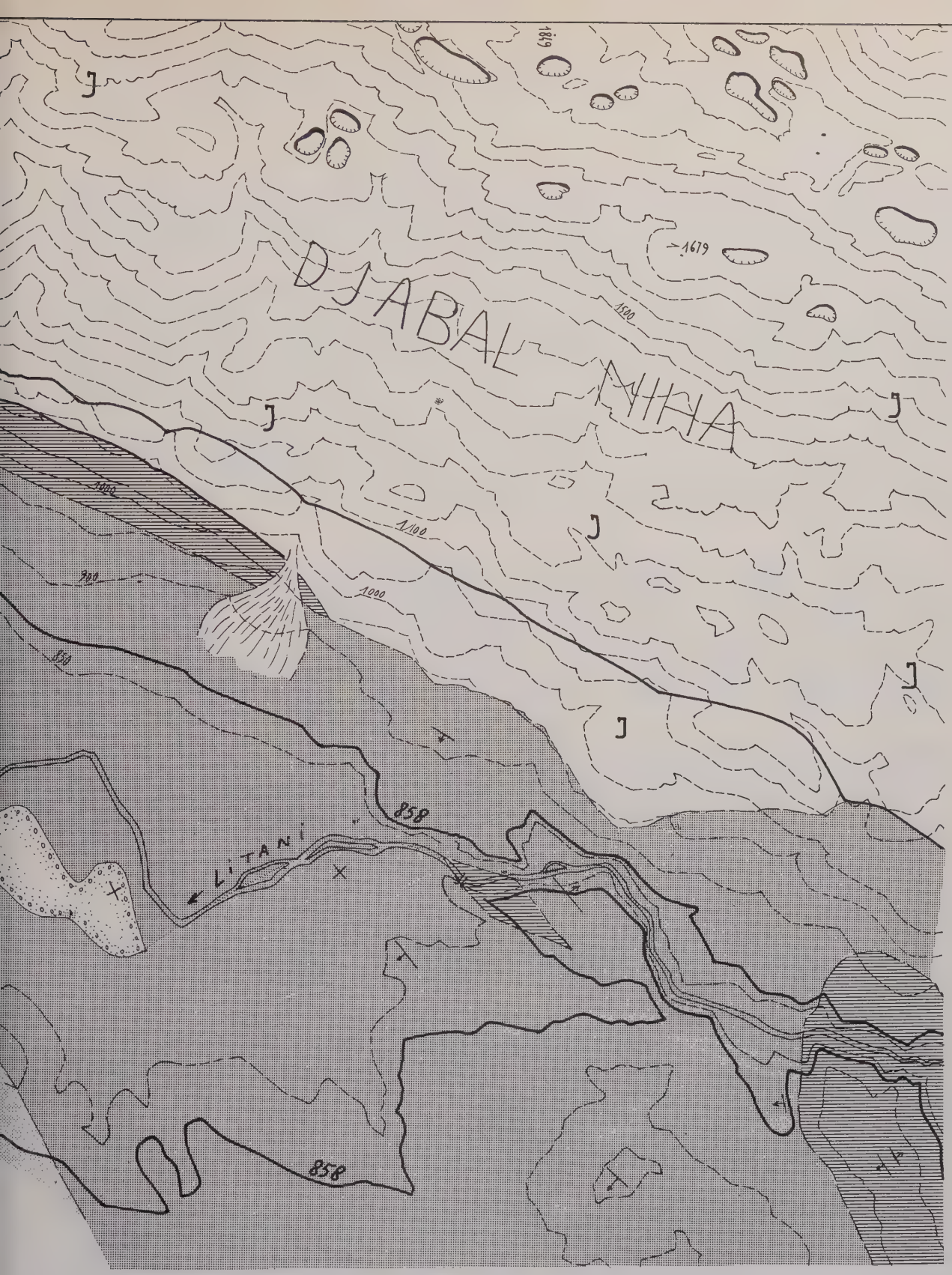


FIG 3

géologie



aires

ZONE A
ZONE B
} 3ones lithologiques

es et dolomies

W
S
N
E

0 500 m. 1 km.

- Le Sénonien et le Paléocène : la puissante série sénonienne (zone B) est un écran étanche à l'échelle régionale ; le Paléocène, moins épais mais plus marneux, renforce l'efficacité de l'écran sénonien.
- L'Eocène : l'Eocène inférieur, marno-calcaire, est médiocrement karstifié surtout dans sa partie inférieure ; il renforce également l'écran du Sénonien-Paléocène. L'Eocène moyen, au contraire, est une formation karstique type qui est à l'origine de la morphologie de la vallée du LITANI à l'aval du barrage.

En résumé :

Dans la série complète B existent deux séquences franchement karstiques : la séquence cénomano-turonienne, puissance 200 m environ, et la séquence de l'Eocène moyen. Ces deux séquences sont séparées par 250 m de marnes et de marno-calcaires étanches.

Dans la série réduite, zone A, la disparition des 250 m de marnes et de marno-calcaires étanches met en contact les deux séries karstiques. Dans cette zone, les séquences marno-calcaires de faible épaisseur intercalées dans la série, peuvent localement jouer le rôle d'écran, mais d'une manière générale, les accidents tectoniques sont suffisamment importants pour permettre le contournement ou le franchissement de ces bancs.

● Structure et fracturation

La structure de l'Eocène moyen calcaire, situé au toit des formations étanches, est la plus caractéristique de la structure de la zone du barrage.

Les calcaires qui le constituent forment grossièrement une cuvette à fond plat (soulignée par deux lambeaux de basalte). A l'Ouest, vers le JABAL NIHA, les couches se relèvent brutalement (45°) et forment un rebord très net à la cuvette. Les torrents affluents du LITANI qui descendent du JABAL NIHA, entaillent régulièrement ce rebord. Vers le barrage, le rebord devient Est-Ouest, puis il franchit le LITANI ; en rive gauche, sa pente diminue (le pendage des couches ne dépasse pas 15°).

A l'amont du site du barrage, rive gauche, les formations plus meubles du Sénonien et du Paléocène affleurent peu. Si la structure générale est évidente, il est difficile sur le terrain de suivre dans le détail les déformations secondaires.

Rive droite, le sommet des collines correspond au contact Eocène-Turonien (sans Sénonien ni Paléocène).

La zone de raccordement entre les zones A et B, c'est-à-dire la retombée vers le LITANI de la colline 1031, est particulièrement complexe.

Les failles sont nombreuses. Les études ont permis de distinguer :

A) une famille de failles principales orientées ENE-WSW dont le rejet vertical est généralement faible et le décalage horizontal. Cette famille de failles découpe la zone à l'amont immédiat du barrage, en compartiments. Elles sont difficiles à suivre sur le terrain où elles se ramifient fréquemment en accidents multiples.

B) plusieurs familles de failles secondaires ; le rejet horizontal de ces accidents est réduit.

3.2. LA KARSTIFICATION

A l'affleurement, sur les deux rives, les calcaires de l'Eocène moyen à l'aval du site et les calcaires sub-lithographiques du Turonien rive droite présentent l'aspect caractéristique des lapiaz. Sur le site, dans les gorges du LITANI, des cavités de dissolution sont également visibles sur les parois dans les bancs calcaires de l'Eocène inférieur. Les autres formations affleurent mal en raison de la couverture alluviale.

Enfin et surtout, les travaux au rocher ont permis de préciser les caractères du karst.

Dans les fouilles du barrage (Eocène inférieur et moyen), des poches karstiques bourrées d'argile rouge ont été mises à jour. Elles se situent toujours dans les premiers mètres.

Des poches argileuses identiques ont également été rencontrées dans les dérivations provisoires. Des vides ont même été signalés dans certains sondages (ex : sondage RM26, cote 860).

Dans les calcaires crayeux de l'Eocène inférieur, les joints d'interstrates sont fréquemment soulignés par de l'argile rouge (qui localement contient encore les silex originels). Ce type d'altération se développe sur 3 à 4 m à partir de la surface.

3.3. HYDROGEOLOGIE

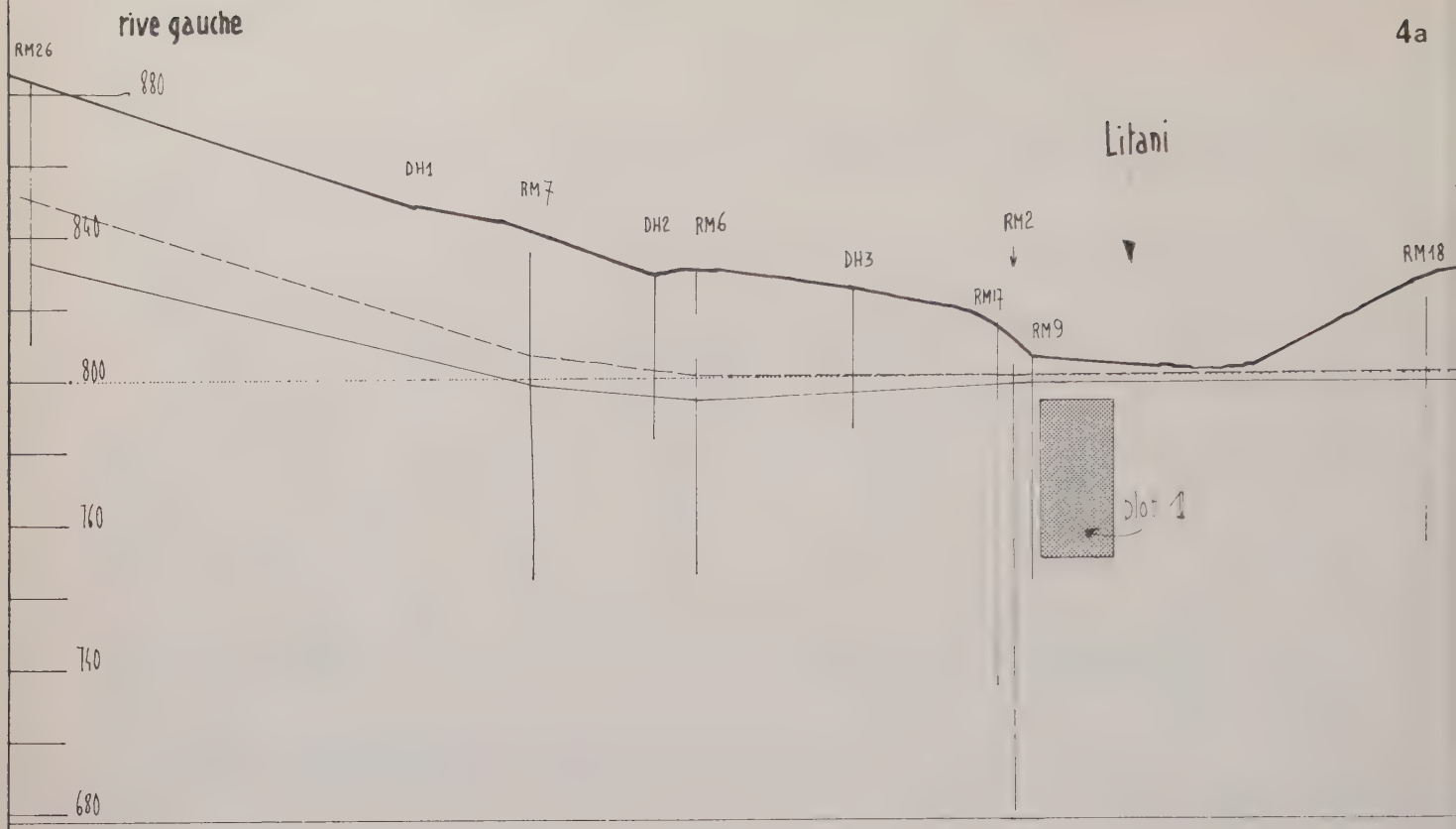
Dans le cadre de l'étude de l'aménagement du LITANI, une étude extrêmement poussée des nappes de fissures par piézomètres a été réalisée.

Les sources qui sortent en rive gauche, au bord du LITANI, des calcaires turoniens (fig. 3), sont les seules sources pérennes importantes signalées dans l'emprise de la retenue (1).

Les nombreux piézomètres implantés (fig. 4) sur le site de l'ouvrage, en particulier rive droite et dans l'oued BELIETE, ont mis en évidence le rôle joué par le Sénonien et le Paléocène. Le bilan de ces mesures échelonnées sur plusieurs années permet de distinguer 3 zones :

1) A l'amont des marnes paléocènes (fig. 3), se situe une zone où les eaux souterraines s'écoulent vers le LITANI.

(1) *Le régime de ces sources et l'étude des caractéristiques de leurs eaux ne paraissent pas avoir fait l'objet d'études particulières ; elles sont vraisemblablement alimentées par la nappe située rive gauche du LITANI.*



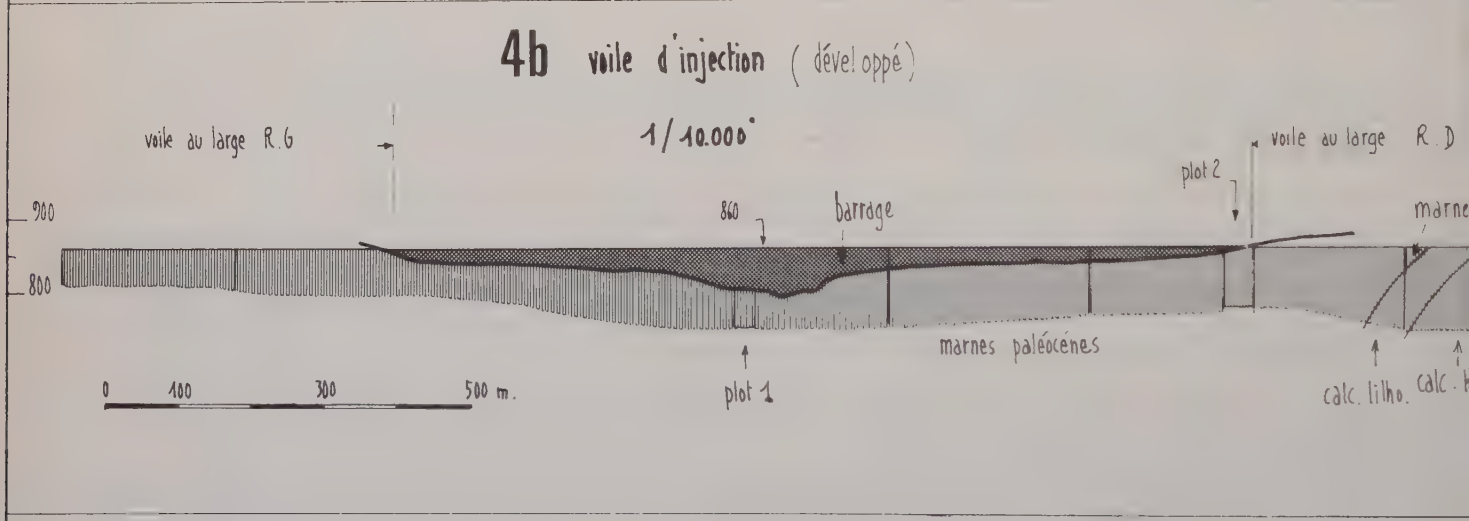


FIG 4

hydrogéologie

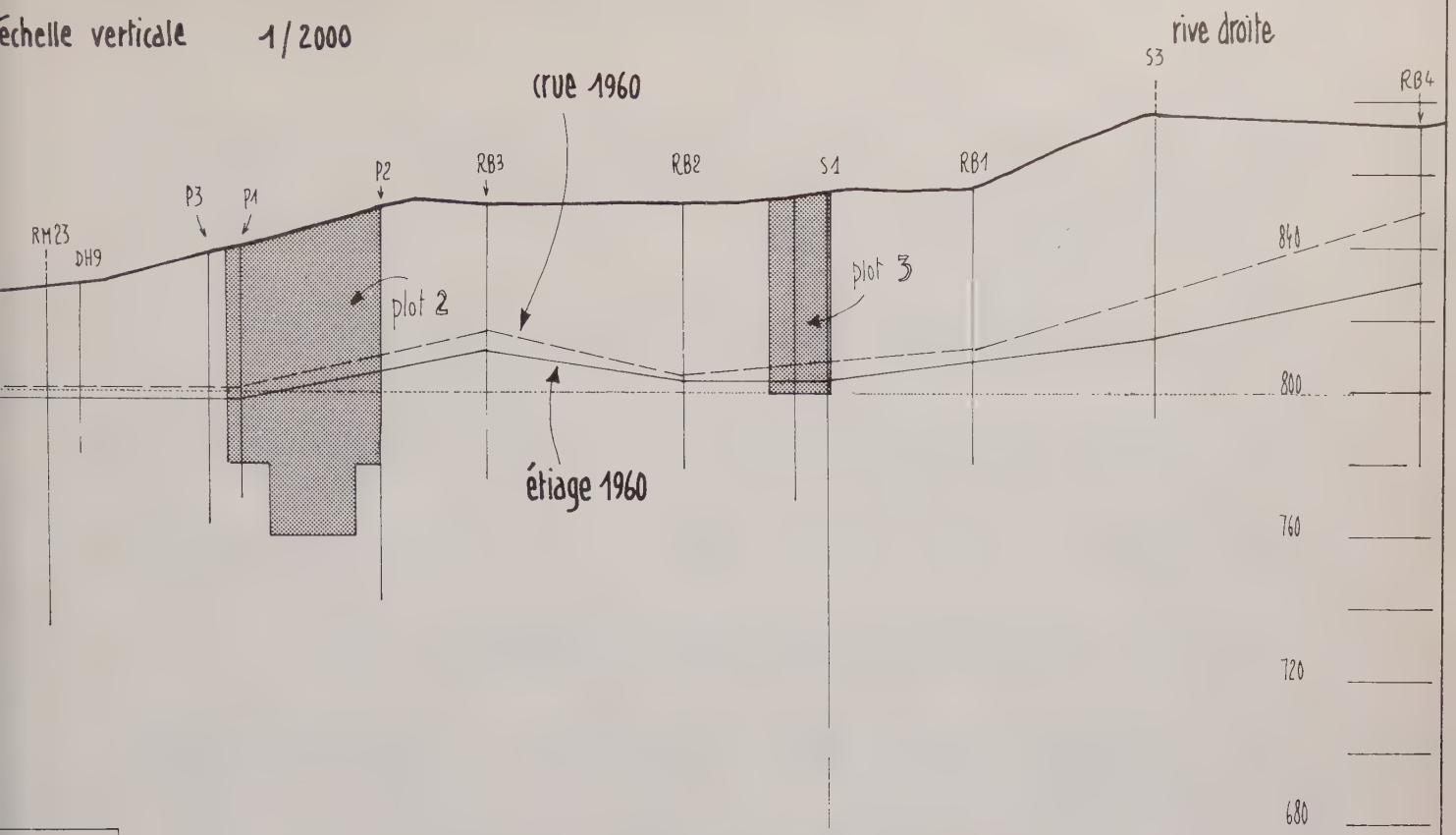
piézométrie _pied amont du barrage 4a

voile d'injection coupe 4b

implantation 4c

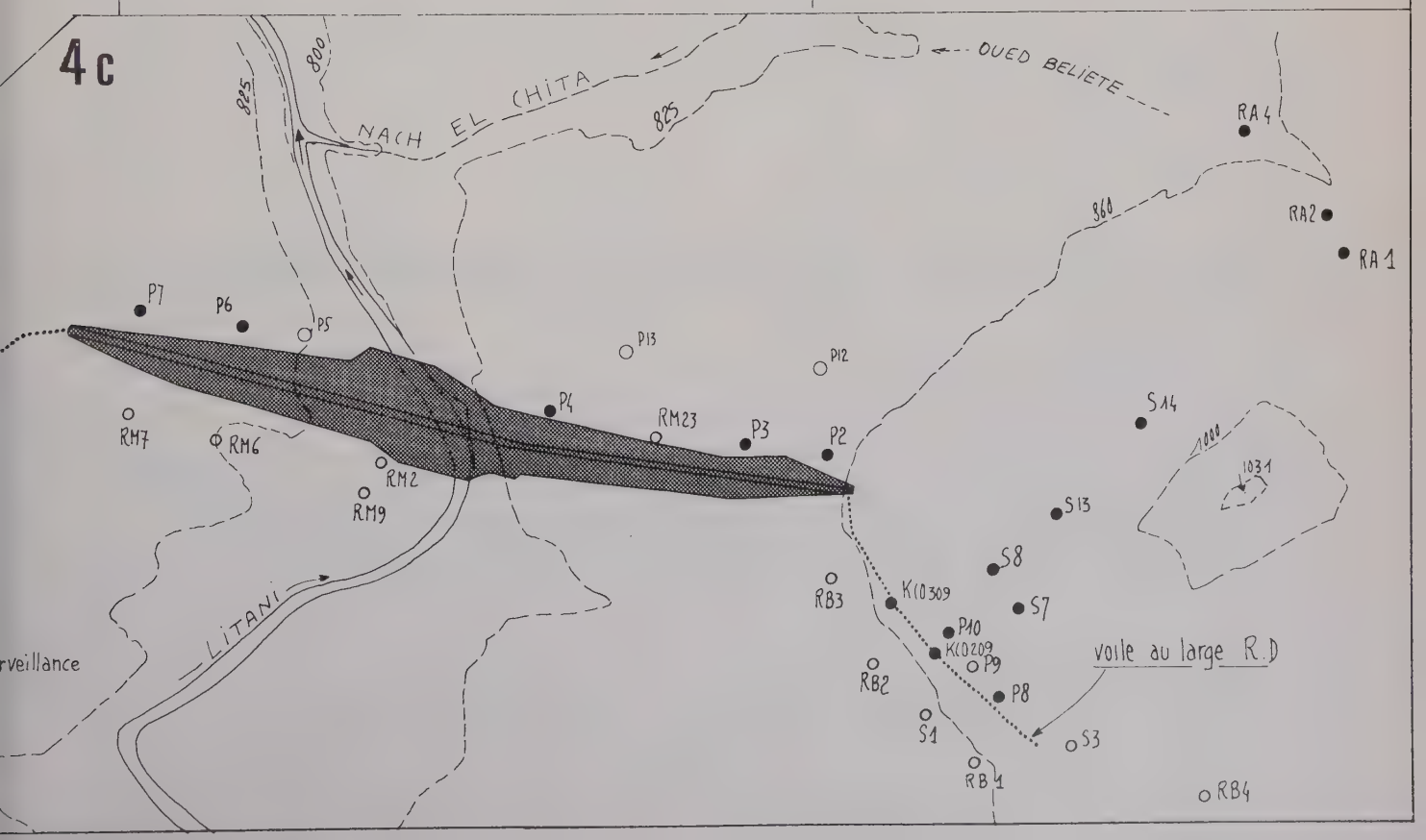
échelle horizontale 1/5000

échelle verticale 1/2000



re à silex

4c



2) A l'aval du site dans les calcaires karstiques de l'Eocène moyen (fig. 4), le drainage se fait vraisemblablement vers le LITANI, mais l'efficacité du drainage naturel dans ces calcaires, liée à l'augmentation de la pente de la rivière, provoque un soutirage vers l'aval suivant des lignes d'écoulement presque parallèles au LITANI.

   Dans le sondage RA4 par exemple, situé dans les calcaires de l'Eocène moyen, à la sortie de l'oued BELIETE, le niveau de l'eau à l'étiage se situe 30 m au-dessous du niveau du LITANI au confluent NAHR ECH CHITA-LITANI.

   Si on considère que le LITANI a une pente voisine de 8,5/1000, cela signifie qu'à l'étiage, les eaux infiltrées dans l'Eocène à l'aval immédiat de l'ouvrage ne peuvent rejoindre le LITANI que plusieurs km à l'aval.

   Les calcaires karstiques de l'Eocène moyen à l'aval immédiat du site peuvent donc appartenir au bassin versant de sources karstiques situées plusieurs km à l'aval.

   En période d'étiage, il est vraisemblable que les eaux du LITANI s'infiltrent partiellement pour alimenter les écoulements souterrains.

3) Dans les collines rive droite, les niveaux dans les piézomètres restent au-dessus de la cote 815 (RB4 par exemple) ; en période de crues, ils dépassent même la cote 850 (exceptionnellement il est vrai).

   Il s'agit donc d'une zone qui se draine mal, avec écoulement vers le LITANI.

   Si les niveaux d'eau n'atteignent qu'exceptionnellement la cote 850, cette zone se distingue très nettement de la zone des calcaires éocènes moyens. La pente de la "nappe" et l'amplitude des variations ne sont pas représentatives d'un drainage karstique.

● Impressions générales sur l'hydrogéologie

Le caractère hydrogéologique principal du site est l'existence à l'aval immédiat du barrage d'une zone dont les limites sont celles de l'Eocène moyen et qui présente un drainage typiquement karstique. A l'amont, près de la rivière et sur les rives, l'alternance de formations étanches (sénoniennes, paléocènes) et karstiques, crée une zone où l'hydrogéologie est confuse. Dans cette zone, ce sont les accidents nombreux et importants qui orientent le drainage, plus que les joints de stratification.

4 - TRAITEMENT D'ETANCHEITE - ZONES D'ABSORPTION ET CHEMINEMENTS POSSIBLES

4.1. TRAITEMENT D'ETANCHEITE

On peut diviser le voile en 2 parties (fig. 4B) :

- une partie comprenant : le voile au large rive gauche, le voile sous l'ouvrage et une partie du voile rive droite. Cette partie du voile raccorde l'ouvrage à l'écran étanche paléocène-sénonien. En pratique, la perméabilité des marno-calcaires de l'Eocène inférieur s'est révélée localement suffisamment faible pour que les injections ne soient pas prolongées jusqu'au Paléocène.

- une deuxième partie constituée par l'extrémité du voile au large rive droite. Cette deuxième partie du voile traite les calcaires karstiques du Turonien et du Cénomanien ; cet écran allonge les lignes de fuites, mais ne peut en raison de la structure se raccorder en profondeur à une formation étanche.

● Caractéristiques générales du rideau d'injection

Surface : 120.000 m2 (voir plan fig. 4B et 4C)
Mètres de forages réalisés : 60.000
Voile monolinéaire avec sondages primaires, secondaires, tertiaires, et quaternaires localement
Espacement des primaires : 8 m

- Modalités d'exécution :
  injection par passe descendante de 5 m
  pression (primaire) : maximum 30 bars
  (secondaire): maximum 60 bars
  coulis ternaire c/e variable

- Consommation moyenne : 151 kg/m2 de voile
  dans les primaires : 676 kg/ml
  dans les secondaires : 255 kg/ml
  dans les tertiaires : 100 kg/ml
  dans les quaternaires : 83 kg/ml

● Résultats des plots d'essais

consommations en kg/mètre linéaire de forage

	primaire	secondaire	tertiaire	contrôle
plot 1 Eocène inférieur	440 540	290 371	74	63
plot 2 Eocène inférieur et moyen	Eocène moyen seul 1169	Eocène moyen seul 574	221-275 Eocène inférieur 310 Eocène moyen	151 à 168 Eocène inférieur 180 Eocène moyen seul
plot 3 calcaire cénomanien karstique	670	480	169	113
voile	676	255	100	83

On constate que pour le plot 1 le traitement s'avère efficace après l'injection des secondaires.

Les calcaires karstiques de l'Eocène moyen et du Cénomanien, plots 2 et 3, nécessitent par contre un traitement par injection des tertiaires et absorbent encore dans les quaternaires.

Il faut signaler que le plot 2 est dans une zone particulièrement fissurée.

4.2. ZONES D'ABSORPTION ET CHEMINEMENTS POSSIBLES

A) Zones d'absorption (fig. 3)

La carte au 1 : 25 000 met en évidence la localisation et l'importance des terrains véritablement karstiques, mouillés par les eaux de la retenue.

B) Les cheminements possibles

- Cheminements à longue distance

Dans l'hypothèse où le voile est étanche, tout cheminement implique le contournement de l'écran sénonien. La carte fig. 5 schématise les différentes hypothèses.

- Cheminement rive gauche

. Hypothèse 1 : le Sénonien n'est contourné que par des circulations karstiques localisées dans le Turonien-Cénomanien et passant sous le synclinal.

Remarque : Le sondage pétrolier de YOHMOR dans la BEKAA a localisé le Turonien à la cote -100 par rapport au niveau de la mer.

Dans cette hypothèse, les résurgences éventuelles apparaîtraient dans la vallée du NAHR HASBANI. La longueur minimum des circulations serait de 11 km.

L'ensemble des conditions nécessaires pour qu'une telle circulation s'établisse rend ce risque peu envisageable.

- Cheminement rive droite

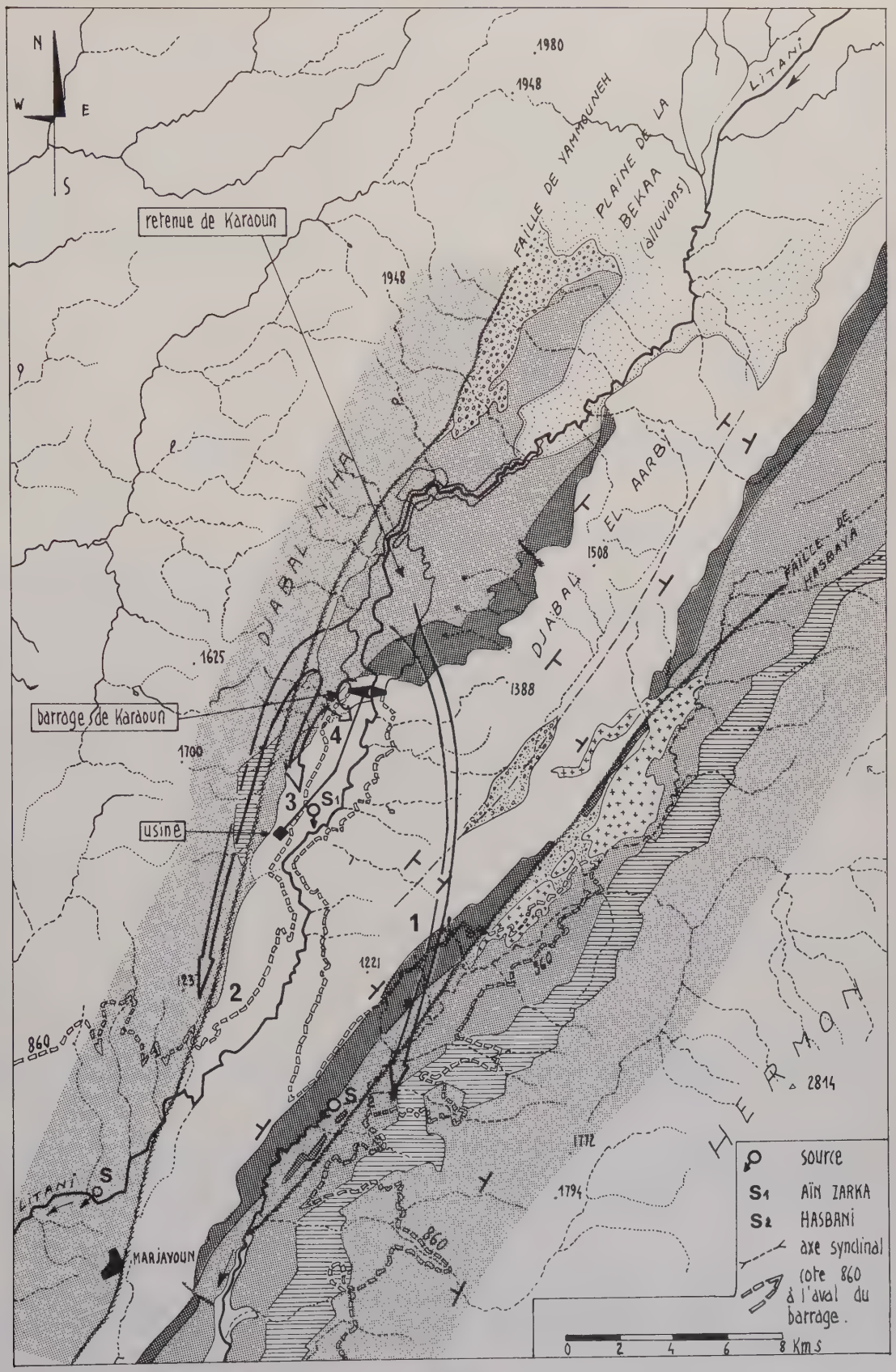
On peut imaginer plusieurs cheminements :

. Hypothèse 2 : des circulations s'établissent dans les calcaires karstiques en direction de la faille de YAMOUNEH ; il y a ensuite drainage des eaux vers l'aval.

La présence de nombreuses sources le long de la faille restituant les eaux karstiques du JABAL NIHA à des cotes supérieures à 850, rend cette hypothèse improbable.

. Hypothèse 3 : des circulations s'établissent dans les calcaires turoniens, puis se poursuivent dans les calcaires éocènes, parallèlement au LITANI, avant de rejoindre ce dernier (par exemple aux sources d'AÏN ZARKA) ; longueur totale du cheminement : 6 km.

FIG 5 cheminements possibles (hypothèses)



Cette hypothèse implique un cheminement assez long dans le Turonien-Cénomanien (4 km par ex.), un franchissement du contact Turonien-Eocène et un cheminement dans les calcaires éocènes.

L'existence d'un réseau important (compte tenu des débits) alimentant la source karstique d'AÏN ZARKA est un argument en faveur de cette hypothèse.

Par contre, il faut rappeler que le contact Turonien-Eocène est une surface tectonique mal connue ; des formations peu perméables (type Eocène inférieur), peuvent également exister dans l'accident et constituer des écrans partiels efficaces.

D'autre part, dans les piézomètres situés dans les calcaires cénomaniens (ex : sondage RE2), les niveaux d'eau s'établissent à des cotes élevées par rapport au LITANI et les amplitudes de leur variation (25 à 30 m) ne sont pas caractéristiques des zones à drainage karstique.

Cette hypothèse ne doit pas cependant être rejetée en raison des accidents capables de favoriser des cheminements localisés.

- Cheminements à moyenne et courte distance

- Rive gauche : dans la mesure où le voile est étanche, les risques de fuites n'existent pas rive gauche.

- Rive droite, hypothèse 4 : Les eaux suivent un cheminement dans les calcaires karstiques turoniens-cénomaniens en passant sous le voile. Il y a ensuite rabattement dans l'Eocène, par exemple à la verticale de l'oued BELIETE (longueur des cheminements : 1500 m). Ce cheminement implique le franchissement de l'Eocène inférieur qui existe dans l'oued BELIETE. Compte tenu des nombreuses fractures tectoniques qui découpent cette zone, ce risque est réel.

5 - MISES EN EAU - BILANS

- Dispositif de surveillance

Le dispositif de surveillance est constitué par une série de sondages équipés en piézomètres(fig. 4C).

Ces piézomètres ont pour but de contrôler l'efficacité du voile à l'aval immédiat de l'ouvrage et de déceler des cheminements éventuels en rive droite au large du barrage, en direction de l'oued BELIETE.

La présence des calcaires karstiques de l'Eocène moyen à l'aval immédiat de l'ouvrage a pour conséquence que les eaux franchissant le voile ou le contournant au large par la rive droite, ne doivent pas logiquement réapparaître à l'aval immédiat de l'ouvrage, mais doivent être recherchées aux exutoires naturels de la nappe karstique de l'Eocène moyen.

● Mises en eau

La mise en eau a été réalisée en 3 étapes (le plan d'eau a été successivement amené aux cotes 818,50, 837, 858,5) conformément au projet.

- 1ère mise en eau : niveau atteint : 818,5. A cette date, il faut signaler que le voile n'était pas terminé.

Bilan : rive gauche : gonflement de la nappe à l'aval du voile ;
rive droite : gonflement de la nappe à l'aval du voile ; la différence piézométrique avec la retenue est de 15 m ;
rive droite au large : la nappe réagit ; réaction légère dans les piézomètres de l'oued BELIETE.

- 2e mise en eau (hiver 1962-1963) :

De part et d'autre du voile, la piézométrie par rapport au plan d'eau de la retenue s'établit comme suit :
. -27 m au droit du LITANI,
. -17 m à l'extrémité gauche du voile.

En rive droite, les observations sont gênées par les pluies persistantes en cette période de l'année.

Pour la rive gauche, les fuites sont estimées à quelques litres/seconde ; en rive droite aucune fuite n'est décelée.

- 3e mise en eau (hiver 1966-1967) : niveau atteint : 858,6.

Le débit des fuites est évalué à 300 1/s. Les points d'émergence ne sont pas localisés.

En se basant sur la piézométrie, les zones de circulation seraient les suivantes :
. en rive gauche, à proximité de P6 et P7 ;
. en rive droite, de part et d'autre du plot 2 dans la zone de raccordement du voile avec le voile du premier projet (1).

Remarque : les fuites apparaissent quand le plan d'eau atteint la cote 854.

● Période d'exploitation

L'exploitation (vidanges et remplissages annuels) de la retenue depuis 1967 n'a pas révélé d'évolution hydrogéologique. Aucune anomalie au remplissage n'a été signalée. Aucune fuite à grande distance n'a été décelée.

Remarque : les vidanges ont permis de mettre en évidence un stockage de l'eau dans le terrain qui atteint plusieurs millions de m3.

°
° °

(1) *Le projet initialement conçu a dû être abandonné ; dans la mesure du possible, les travaux réalisés ont été intégrés dans la deuxième solution.*

Photo R. THERO

Photo 1
BARRAGE DE L'OUED NEBAANA

1 : parement de l'évacuateur de crues
On distingue parfaitement les calcaires campaniens (2) qui reposent sur les marnes inférieures (3) (marnes emscheriennes).
Pendage des couches : 15 à 30° ; hauteur de la coupe : 70 m ; l'épaisseur moyenne des strates est inférieure à 1 m.

CHAPITRE

11

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Nebaana

(Tunisie)

PLAN

1 - Généralités

- Caractéristiques des ouvrages et de la retenue
- Problème de l'étanchéité
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel

- Les risques de fuites

3 - Les traitements - Mise en eau - Bilan

°
° °

Figure 1 : Carte géologique du site, 1 : 10 000

Figure 2 : Coupes géologiques

Figure 3 : Hypothèses sur les cheminements de fuites possibles, 1 : 10 000

Figure 4 : Voile d'étanchéité, importance des fuites, mise en eau, résurgences

Figure 5 : Hypothèses sur les cheminements, 1 : 10 000

Remarque : La complexité de la géologie et de l'aménagement a nécessité l'utilisation exceptionnelle de l'échelle 1 : 10 000 pour les cartes.

Photo 1 : Parement de l'évacuateur de crues

Photo 2 : Diaclase à remplissage incomplet de calcite

°
° °

Bibliographie :

- R. SAMAMA, P. VIGIER, P. HYUNH, F. SABARLY (1970) - Barrage sur l'oued NEBAANA, problèmes d'étanchéité de la retenue - Communication au Congrès des Grands Barrages - Montréal - Q. 37 - R. 37 - 9 pages.
- Cabinet d'Etudes RUBY (1969) - Essai de coloration dans la retenue du NEBAANA (rapport de mission).
- Documents divers (rapports géologiques) inédits.

RESUME

Le barrage en enrochements du NEBAANA (hauteur 62,5 m.) est édifié sur l'Oued NEBAANA (TUNISIE) afin d'assurer la régularisation pluriannuelle des apports de la rivière dont le débit moyen est voisin de 1 m^3/s.

L'ouvrage prend appui sur une formation calcaire appartenant à la retombée amont d'un anticlinal faillé orienté N-S. Le NEBAANA, qui coule de l'Ouest vers l'Est, franchit en travers-bancs cet anticlinal qui marque la limite Est d'une zone de collines constituée par une série de plis, tous orientés N-S. La série sédimentaire intéressée par l ouvrage et la retenue comprend deux séquences calcaires et deux séquences marneuses; de bas en haut, les marnes inférieures, les calcaires du CAMPANIEN (135 m.), les marnes supérieures (150 m.) et les calcaires lutétiens (160 m.). L'épaisseur de ces séquences peut être très variable. Le barrage prend appui sur les calcaires du CAMPANIEN et sur les marnes supérieures. La retenue se développe sur les marnes supérieures et sur les calcaires du LUTETIEN. Les nombreuses failles secondaires,parallèles à la grande faille qui lamine la retombée aval de l'anticlinal,mettent en contact, en de nombreux endroits, les deux séries calcaires. La plupart des accidents sont soulignés par d'épais remplissages de calcite.

La karstification est peu spectaculaire; quelques fissures ouvertes ou argileuses ont été rencontrées en sondage.

Le NEBAANA constitue le niveau de base des écoulements souterrains. Avant la mise en eau, deux sources étaient connues sur la retombée Est de l'anticlinal : au Nord, à 1.500 m. du barrage, la source sulfureuse AIN EL KEBRIT (quelques litres/seconde); au Sud la source d'AIN EL HAMMAN.

Sur les deux rives, les risques de fuites étaient liés à la structure complexe et faillée de l'anticlinal. En rive droite, des fuites pouvaient être envisagées à travers les calcaires lutétiens en direction de l'Oued OHEICHE, affluent du NEBAANA; en rive gauche, en direction de la source d'AIN EL KEBRIT, à partir des calcaires lutétiens. En raison de la valeur de l'eau, un voile très soigné et un tapis étanche ont été réalisés pour éliminer les possibilités de fuites à travers les calcaires campaniens constituant les appuis du barrage.

En 1965, une mise en eau partielle a été réalisée; des fuites étaient décelées dans l'Oued OHEICHE en rive droite (10 l/s. environ); pour ces circulations, le rôle joué par les diaclases à remplissage de calcite était évident. En rive gauche, le débit de la source d'AIN EL KEBRIT augmentait (quelques dizaines de litres/seconde). Malgré le faible débit des fuites, en raison de la valeur de l'eau, des traitements de surface étaient réalisés en rive droite permettant de réduire, sur cette rive, le débit des fuites.

°°°

SUMMARY

NEBAANA dam is a 62.5 metres high rockfill embankment on the wadi NEBAANA in TUNISIA for over-year inflow regulation. Mean river flow is about 1 m^3/s.

The dam sits on a limestone formation belonging to the upstream limb of a faulted anticline running N-S. The NEBAANA flows from west to east, and cuts through the beds in the anticline. The anticline marks the eastern boundary of a zone of hills formed by a series of folds, all running N-S. The sedimentary series involved with the dam and the reservoir includes two limestone sequences and two marlaceous sequences. Going from bottom to top, there are lower marls, CAMPANIAN limestones (135 m thick), upper marls (150 m) and Lutetian limestones (160 m). These beds vary in thickness at different places. The dam sits on the CAMPANIAN limestones and upper marls. The lake covers upper marls and LUTETIAN limestones. The very many secondary faults parallel to the major fault laminating the downstream limb of the anticline, bring the two limestone series into contact with each other at several points. Most faults are marked by a thick filling of calcite.

The karstification is not very spectacular. Only a few open and clay-filled fissures were found by drilling.

The wadi NEBAANA forms the base level of underground flow. Before the reservoir was filled, there were two springs on the eastern limb of the anticline, the AIN EL KEBRIT sulphur spring 1500 m north of the dam with a flow of a few litres/s, and the AIN EL HAMMAN spring to the south.

Potential leakage on both banks was connected with the complex faulted structure of the anticline. On the right bank, there was a possibility of leakage flowing through the Lutetian limestones towards wadi OHEICHE, a tributary to the NEBAANA. On the left bank, leakage from the Lutetian limestones could conceivably be directed towards AIN EL KEBRIT spring. The water was very valuable at this project and a meticulous grout curtain and upstream blanket were therefore realized to eliminate the possibility of leakage through the Campanian limestones forming the dam abutments.

The reservoir was partially filled in 1965. Leakage of about 10 litres/s was found on the right bank in the wadi OHEICHE. The calcite-filled cracks certainly played a part in this. On the left bank, discharge from AIN EL KEBRIT spring increased by a few tens of litres/s. Although the leakage rate was low, the water was so valuable that surface treatment was carried out on the right bank to cut it down at this point.

1 - GENERALITES

La retenue du NEBAANA est destinée à assurer, pour les besoins agricoles, une régularisation pluri-annuelle des apports de l'oued NEBAANA et de l'oued BEL ASSOUD. Elle joue également un rôle d'écrêteur de crue.

L'aménagement de l'oued NEBAANA a été conçu et réalisé par les services du Ministère de l'Agriculture de la République Tunisienne (Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural), assisté par le Bureau Coyne et Bellier (Paris - France).

L'ouvrage a été achevé en 1966.

● CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES ET DE LA RETENUE

- Digue principale : l'ouvrage est une digue en enrochements avec une recharge amont en terre ;
  hauteur : 62,5 m
  longueur en crête : 500 m
  volume : 2.300.000 m3

- Digues annexes : la plus importante a une hauteur de 18 m. Le volume cumulé des 3 digues annexes est de 210.000 m3.

- Retenue : le plan d'eau normal est à la cote 230
  capacité : 86.10^6 m3
  apports annuels : 35.10^6 m3

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

Le problème de l'étanchéité a été, pour les deux raisons suivantes, un des problèmes majeurs de cet aménagement.

1) La faiblesse des apports moyens annuels (1 m3/s) ne permettait pas de tolérer des pertes supérieures à quelques dizaines de litres par seconde.

2) La nature calcaire de la plus grande partie des formations mouillées par les eaux de la retenue, leur continuité et la structure géologique, multipliaient dangereusement les possibilités théoriques de fuites.

● LA KARSTIFICATION REGIONALE

Elle est mal connue et n'a pas fait l'objet (à notre connaissance) d'études exhaustives.

L'impression première est que les indices karstiques (grottes, avens, lapiaz) sont rares.

En se limitant à des considérations générales, trois causes peuvent avoir limité ou freiné l'importance de la karstification :

1) La mise à jour récente des calcaires

L'existence d'épais poudingues plio-quaternaires au sommet de la série prouve en effet que le relief actuel est un relief récent. Les calcaires ont donc été recouverts et par conséquent protégés jusqu'à une date géologiquement récente.

2) L'existence d'écrans étanches entre les séries calcaires

Les puissantes séries marneuses (en particulier les marnes priaboniennes) intercalées entre les horizons calcaires, ont joué et continuent à jouer un rôle protecteur en contrariant la pénétration de l'eau dans les horizons calcaires, sauf, peut-être, dans les séries très redressées.

3) Les conditions climatiques régionales durant le quaternaire

Depuis la fin du pliocène jusqu'à nos jours, les climats qui se sont succédés en Afrique du Nord ont été le plus souvent de tendance aride ou semi-aride ; sauf dans les régions montagneuses et ce n'est pas le cas ici (les sommets dépassant à peine 300 m), les conditions climatiques n'ont donc pas été particulièrement favorables à une karstification intense.

2 - LE CADRE NATUREL (fig. 1)

2.1. MORPHOLOGIE ET STRUCTURE

A l'échelle régionale, l'ouvrage est situé à la limite de deux zones de morphologie bien différenciée.

A la hauteur du barrage, l'oued NEBAANA dont le cours est sensiblement Est-Ouest, quitte une zone de collines pour pénétrer dans une zone de morphologie tabulaire qui descend doucement vers l'Est.

La zone des collines où se développe la retenue, est constituée par une succession de crêtes orientées N-S. Ces crêtes sensiblement horizontales, sans sommets bien individualisés, culminent aux alentours des cotes 300-350.

Elles correspondent aux niveaux lithologiques les plus durs (calcaires en général) de la série sédimentaire. Cette série est plissée et forme plusieurs anticlinaux d'axe N-S qui constituent la zone des collines.

C'est à la hauteur du site du barrage que l'oued NEBAANA franchit le dernier de ces anticlinaux, caractérisé par une structure particulièrement complexe et en particulier dissymétrique.

FIG 1

poudingues plio-quaternaires 1

marnes méso-nummulitiques 2

calcaires lutétiens-ladinien et marno-calcaires à la base 3a 3b

marnes supérieures 4

calcaire campanien 5

marnes inférieures 6

faille ou zone faillée

talus d'érosion

source

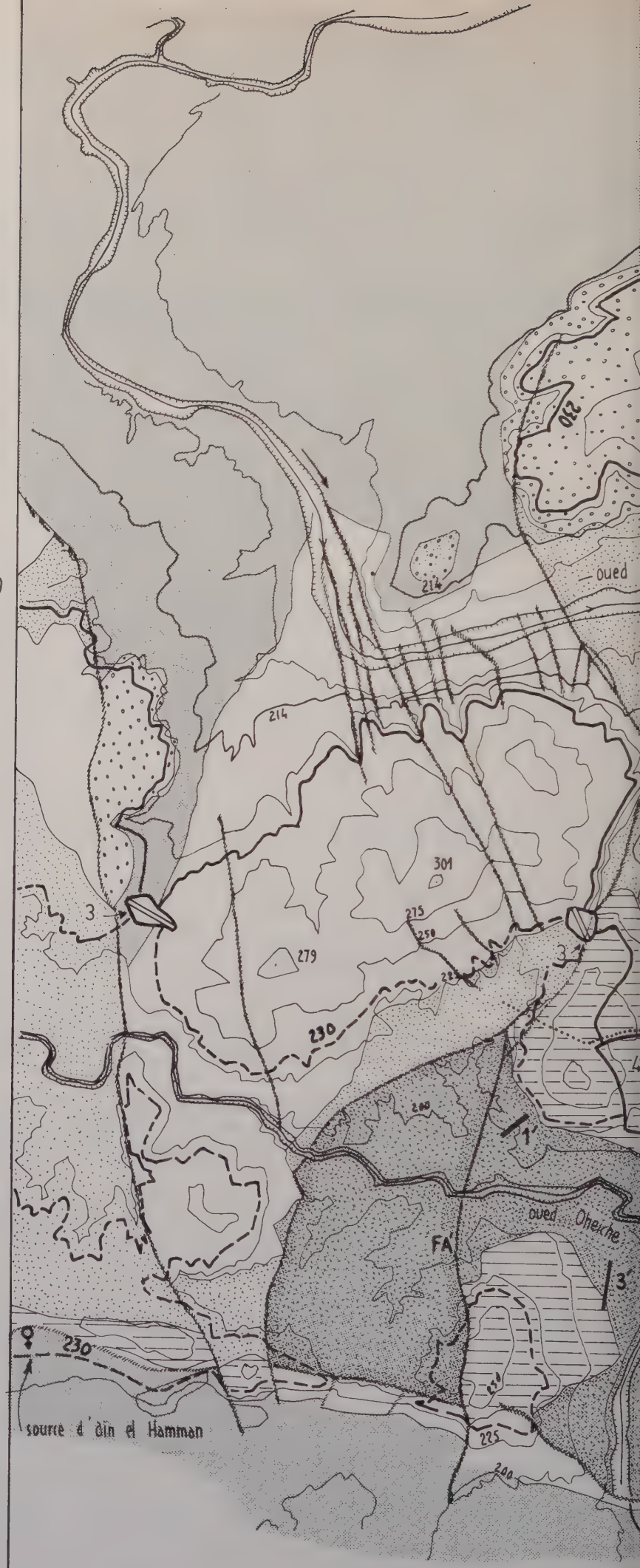
niveau normal du plan d'eau de la retenue 230

cote 230 à l'aval a l'aval du barrage

4 — 4' coupe voir fig. 2

1 barrage principal
2 tapis étanche
3 digues annexes
4 évacuateur de crue
5 ouvrage de prise
6 rideau d'injection
7 galerie de drainage

0 500 m.



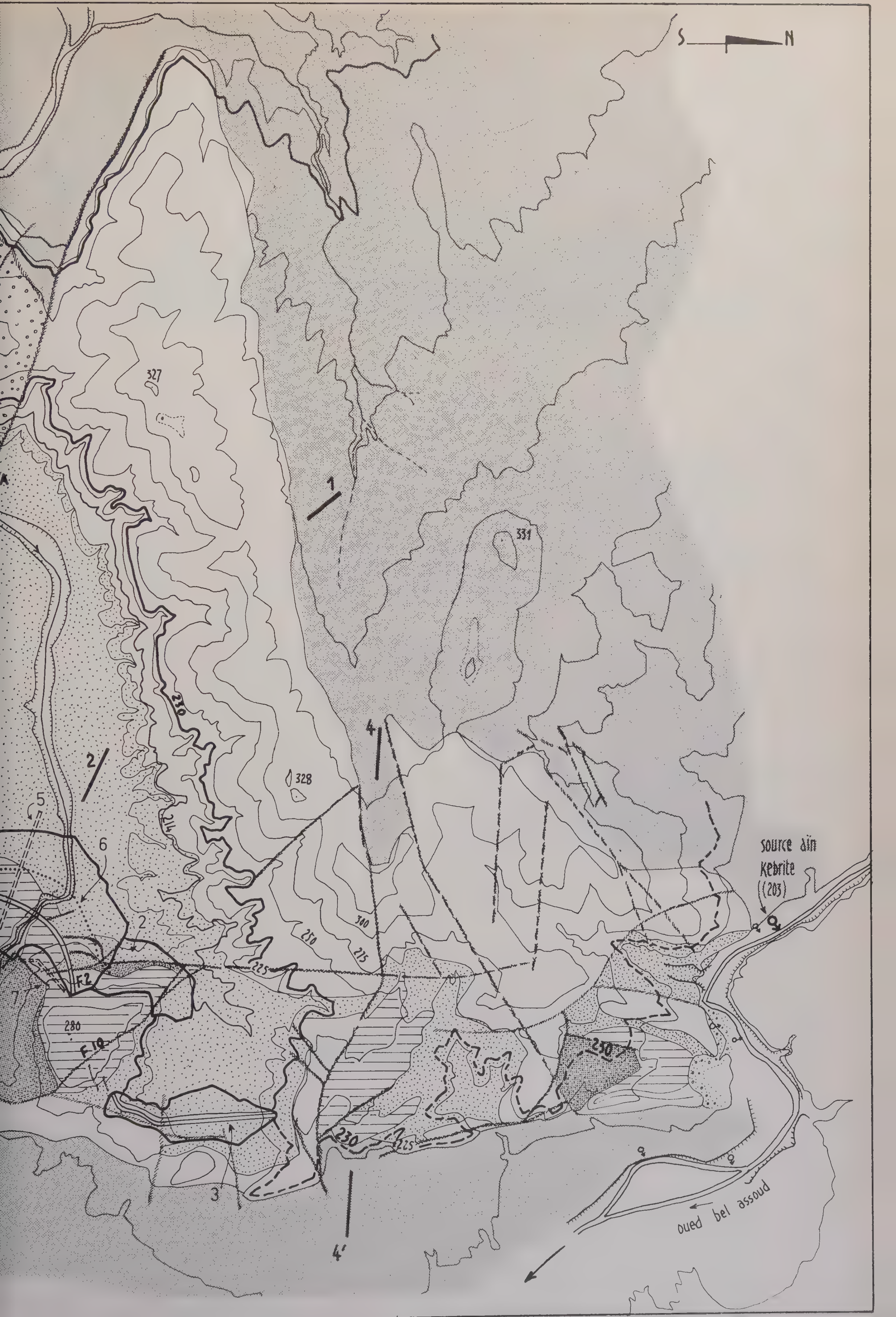
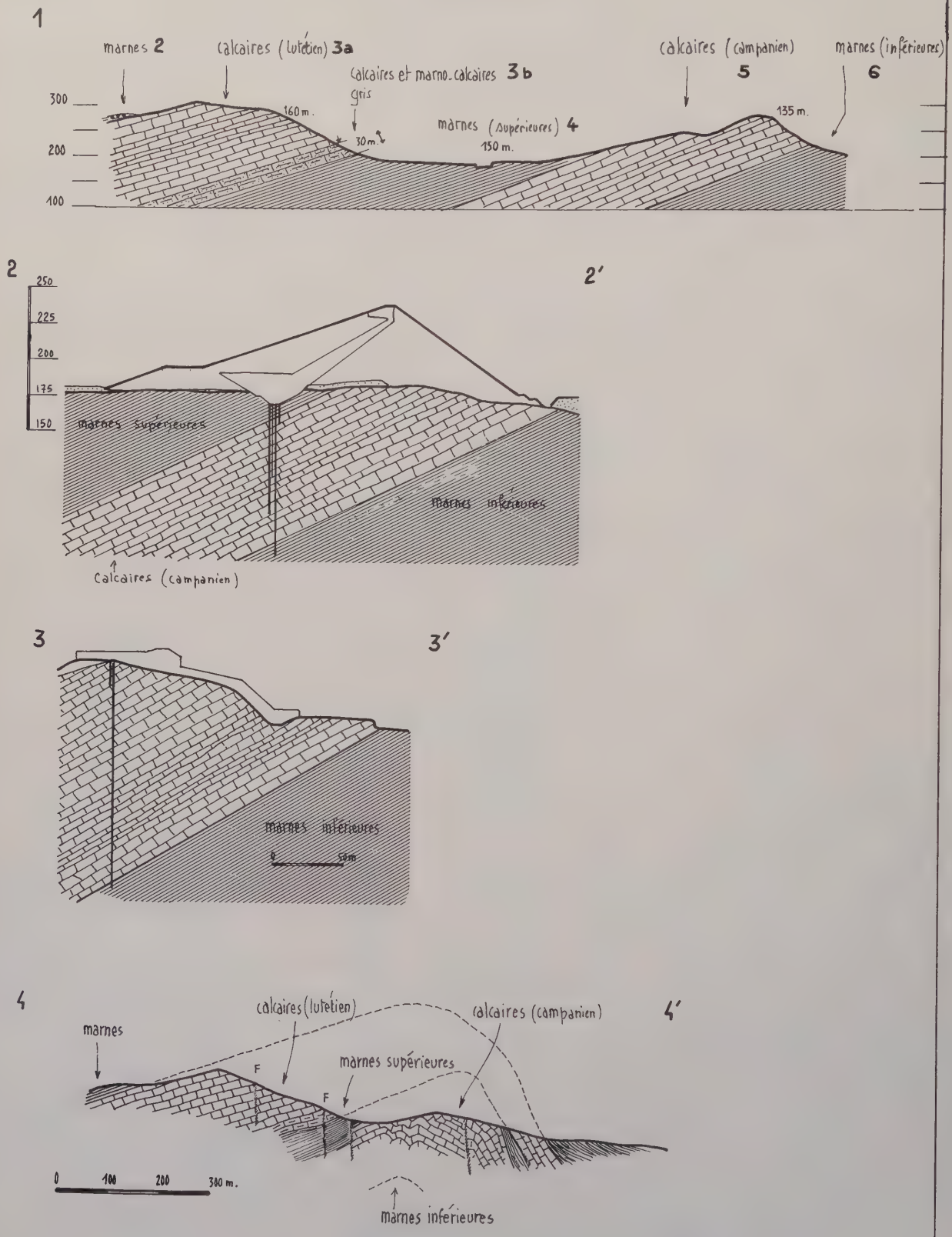

S
N
327
331
328
1
2
4
4'
5
6
2
7
3
230
214
225
300
250
275
280
F2
F.10
250
230
225
source aïn
Kebrite
(203)
oued bel assoud

FIG 2

coupes géologiques



implantation voir fig 1

A l'amont du site du barrage, l'oued NEBAANA coule à la cote 200 environ.

Les crêtes dépassant de peu la cote 300, les versants naturels ne s'élèvent donc que rarement à plus de 150 m au-dessus de la rivière (1).

Les circulations souterraines éventuelles se feront donc, le cas échéant, sous des couvertures le plus souvent inférieures à 100 m, c'est-à-dire dans des zones du massif où les phénomènes de surface peuvent être encore sensibles.

2.2. GEOLOGIE (fig. 1 et 2)

● Stratigraphie

La coupe 1-1', fig. 2, représente la coupe naturelle la plus régulière de la série stratigraphique des terrains intéressant la retenue et le barrage.

Dans le cadre du problème de l'étanchéité, les formations suivantes ont été distinguées ; en partant de la formation la plus récente vers la plus ancienne, la série se présente comme suit :

- plio-quaternaire : poudingues - 1 -

- (tertiaire) Eocène moyen et inférieur	marnes - 2 -	
	calcaires crayeux blancs - 3a -	Lutétien
	calcaires et marno-calcaires gris - 3b -	Londinien
	marnes supérieures "suessoniennes" - 4 -	
- (crétacé)	calcaires campaniens - 5 -	Sénonien
	marnes inférieures "emscheriennes" - 6 -	Sénonien

La coupe 1-1', fig. 2, située dans une des zones les moins tectonisées de la retenue, permet d'évaluer l'épaisseur des différentes formations. Les épaisseurs mesurées (voir coupe) n'ont cependant qu'une valeur relative ; en effet, les autres coupes (2-2', 3-3') montrent que l'épaisseur des diverses formations varie dans l'emprise des ouvrages. L'épaisseur moyenne des séries marneuses reste cependant toujours suffisante pour qu'elles puissent être considérées comme des écrans étanches.

● Lithologie

- Les calcaires :

Les calcaires campaniens, bien visibles aux abords de l'ouvrage principal et en particulier dans l'excavation de l'évacuateur de crue (photo 1), sont des formations assez tendres dont la résistance à la compression est comprise entre 300 et 800 bars. Elles sont stratifiées en couches de plusieurs décimètres de puissance, séparées par des intercalations marno-argileuses de quelques centimètres à plus d'un décimètre d'épaisseur.

(1) *La nécessité, pour créer un plan d'eau à la cote 230, de compléter l'ouvrage principal par 3 digues annexes, montre que le projet utilise au maximum les ressources de la topographie.*

Du point de vue lithologique, les calcaires lutétiens sont très semblables aux calcaires campaniens. Par conséquent, vis-à-vis des problèmes d'étanchéité, ils auront un comportement analogue.

- Les marnes et les marno-calcaires (photo 1) constituent des séries monotones de couleur grise ou noirâtre, contenant des nodules pyriteux. Les marnes inférieures sont extrêmement franches ; les marnes supérieures sont en comparaison plus marno-calcaires.

● Tectonique et fracturation : fig. 1 et 2 (coupe 4-4')

L'anticlinal complexe d'axe N-S qui forme la limite Est de la zone des collines, est caractérisé par une dislocation générale (fig. 1). Des failles multiples découpent les formations calcaires en "plaques".

La plupart des diaclases et les failles franches (ex. FA, fig. 1) sont soulignées par un important remplissage de calcite automorphe. Ces zones faillées ou broyées peuvent atteindre plusieurs mètres de puissance.

Les levers géologiques ont mis en évidence une exceptionnelle densité de diaclases et de failles secondaires, également soulignées par des remplissages de calcite (photo 2).

Les failles se groupent en deux réseaux :

- un réseau NE-SW parallèle à l'axe de l'anticlinal complexe ;
- un réseau WNW-ESE perpendiculaire au précédent.

2.3. LA KARSTIFICATION LOCALE

En surface, dans la zone de l'aménagement et plus particulièrement dans la zone des digues, les indices karstiques sont rares. Par contre, les travaux au rocher (par exemple l'excavation de l'évacuateur de crue, le creusement de la carrière) ont mis à jour des diaclases élargies par dissolution et incomplètement remplies d'argile.

Aucune karstification ancienne n'a pu être mise en évidence. Les faciès lithologiques ne semblent d'ailleurs pas indiquer qu'il y ait eu des phases d'émersion entre les périodes de dépôt des marnes et les périodes de dépôt des calcaires (1).

Si les indices karstiques sont rares en surface, on observe par contre de nombreuses diaclases à remplissage incomplet de calcite (photo 2 déjà citée). La continuité de ces accidents est démontrée par les circulations qui empruntent certaines de ces diaclases.

(1) *Période durant laquelle un karst aurait pu se développer dans les calcaires temporairement exposés.*

Photo R. THEROND

Photo 2
BARRAGE DE L'OUED NEBAANA – TUNISIE

Diaclase avec un important remplissage (incomplet) de calcite : (1) dans la rive gauche de l'Oued Oheiche. L'eau : (2) qui sort de la fissure, provient de la retenue du barrage.

nebaana _ tunisie FIG 3

hypothèses sur les cheminements de fuites possibles

cheminement possible _ circulation dans la masse _ diaclases, joint de strate ... type nappe de fissures.

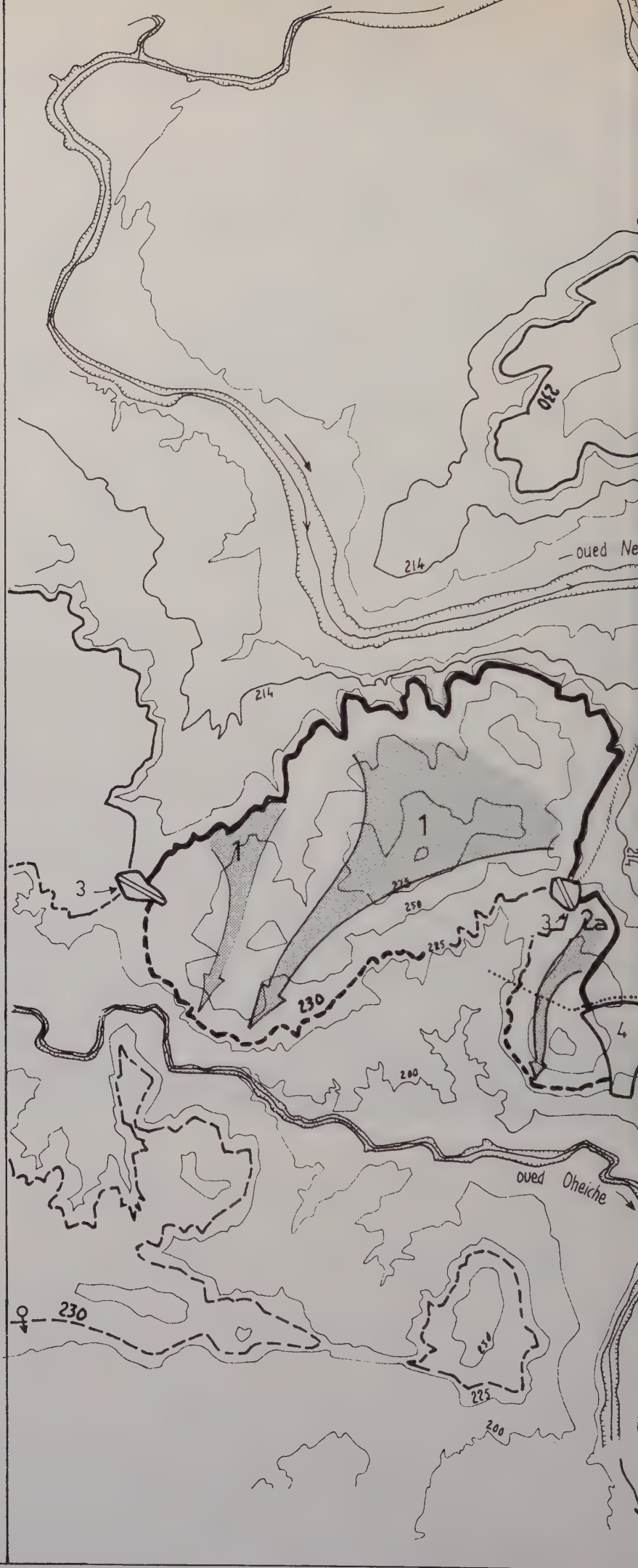
F cheminement possible par des failles individualisées

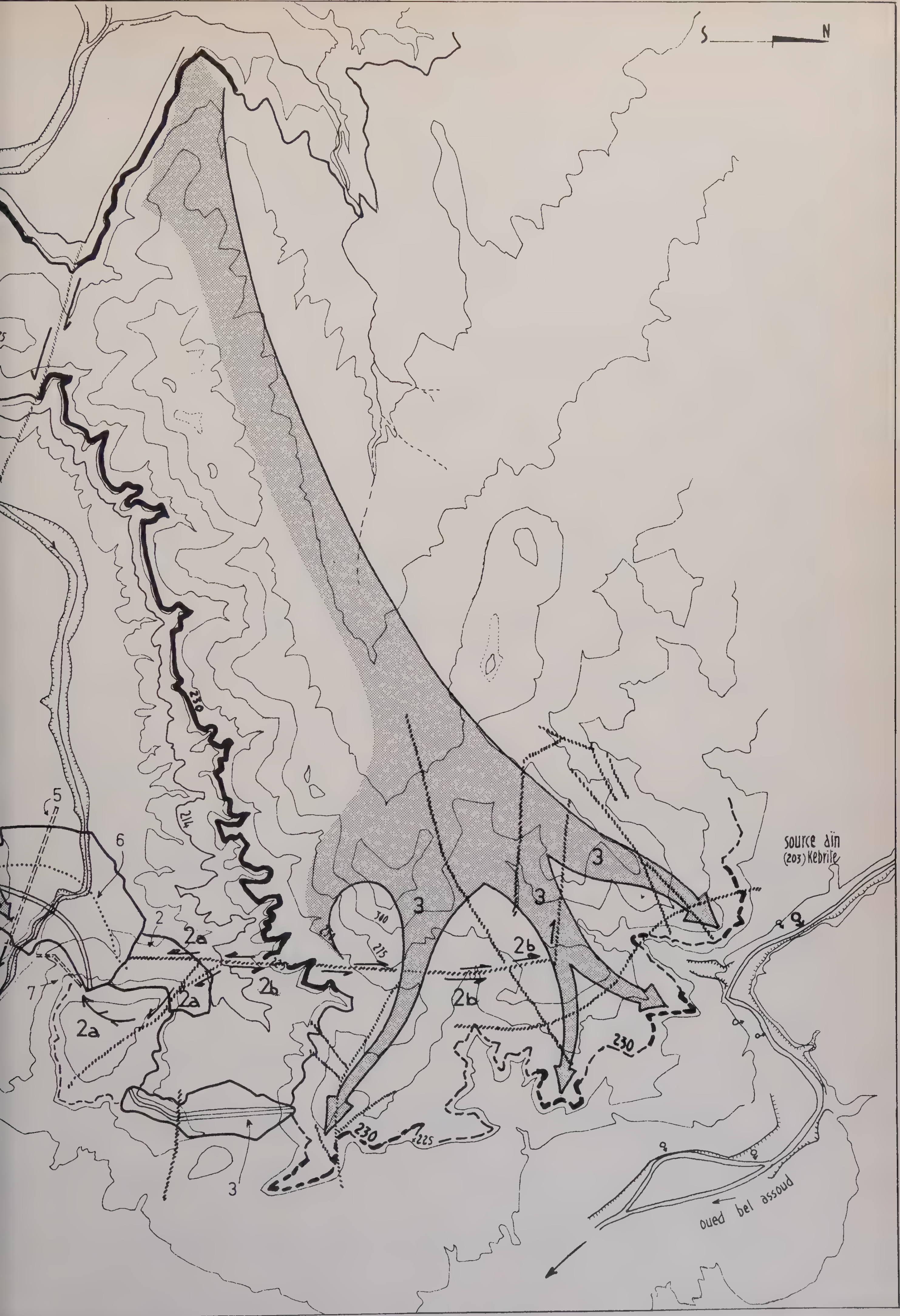
zone d'infiltration possible à la cote 230 et éventuellement au dessous.

zone de restitution possible à la cote 230 et au dessous.

1 barrage principal
2 tapis étanche
3 digues annexes
4 évacuateur de crue
5 ouvrage de prise
6 rideau d'injection
7 galerie de drainage

0 500 m.





S
N
5
6
7
2
2a
2a
2a
2b
2b
2b
2b
3
3
3
3
230
214
230
225
300
215
230
source aïn
(203) Kebrite
oued bel assoud

L'origine karstique de ces vides n'est cependant pas toujours évidente.

Les sondages ont également mis en évidence des vides : maximum 21,75 m. Il s'agit dans ce cas extrême d'une cassure verticale prise en enfilade par la sondeuse.

2.4. HYDROGEOLOGIE

En raison de sa faible pente et de son altitude, l'oued NEBAANA constitue le niveau de base régional.

La carte, fig. 1, situe les deux principales sources qui existaient avant la mise en eau.

La source d'AÏN KEBRIT est une source sulfureuse sortant des calcaires lutétiens. Sa localisation est en liaison avec les grandes cassures de l'anticlinal complexe qui marque à l'Est la fin de la zone des collines.

La source se présente comme une vasque déversante dont les parois sont tapissées par des dépôts visqueux grisâtres ; une goulotte permet la surveillance de son débit. L'eau dégage une nette odeur de H_2S.

Avant la création du barrage, le débit de cette source était de quelques litres/seconde (renseignement oral) ; sa température de 30° environ.

La source AÏN EL HAMMAN est située sur la retombée E de l'anticlinal (coin inférieur gauche de la carte).

LES RISQUES DE FUITES (fig. 3)

Les calcaires lutétiens et campaniens constituent les formations suspectes.

Les marnes inférieures, supérieures et priaboniennes forment au contraire des écrans étanches.

Les failles et les diaclases, par leur nombre et la nature de leur remplissage, augmentent les possibilités de circulations. Dans certaines zones, il faut même envisager que les formations étanches puissent être franchies par des circulations souterraines empruntant des cassures.

L'existence simultanée des calcaires et des failles multiplie donc les possibilités théoriques de fuites.

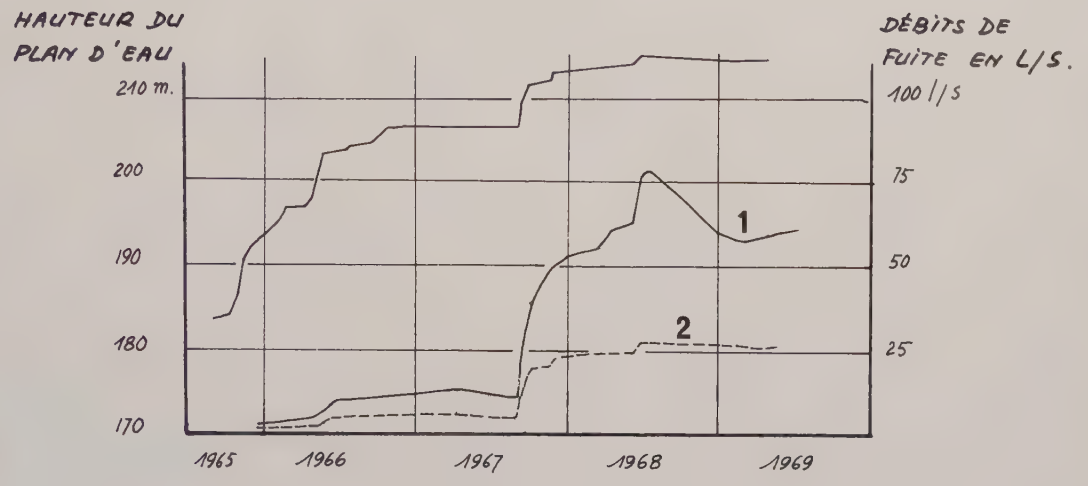
En raison de la tectonique compliquée, le problème est particulièrement complexe en rive gauche.

En simplifiant, on peut ramener les possibilités de fuites aux cas suivants (fig. 1 et 3) :

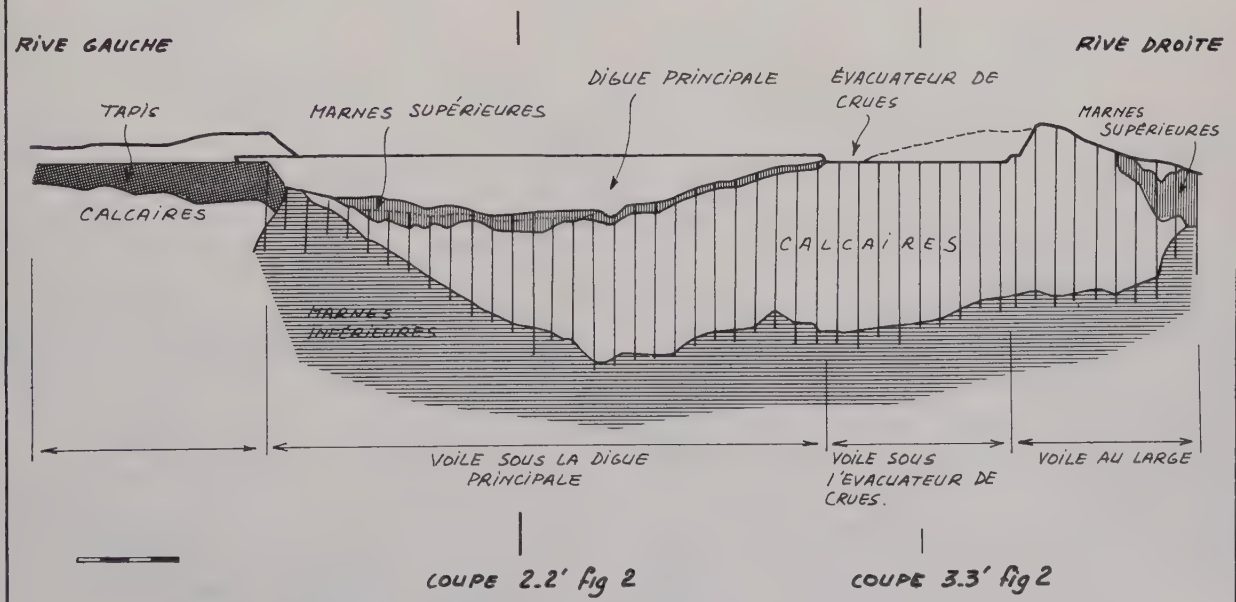
FIG 4

IMPORTANCE DES DÉBITS DE FUITE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE L'EAU DANS LA RETENUE

1 FUITE RIVE GAUCHE
2 FUITE RIVE DROITE



VOILE D'ÉTANCHÉITÉ DÉVELOPPÉ



COUPE 2.2' fig 2

COUPE 3.3' fig 2

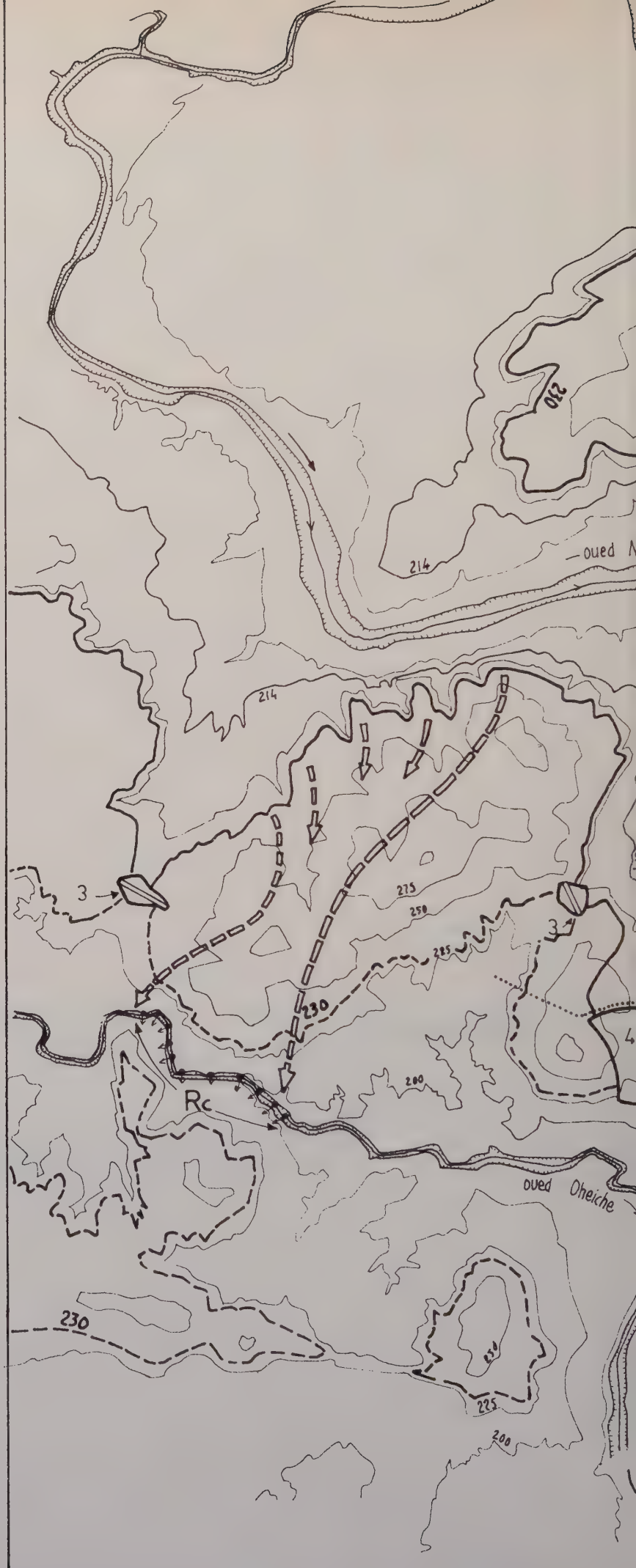
nebaana _ tunisie FIG 5

mise en eau à 214 _ localisation des principales résurgences _ hypothèses sur les cheminements souterrains .

résurgences

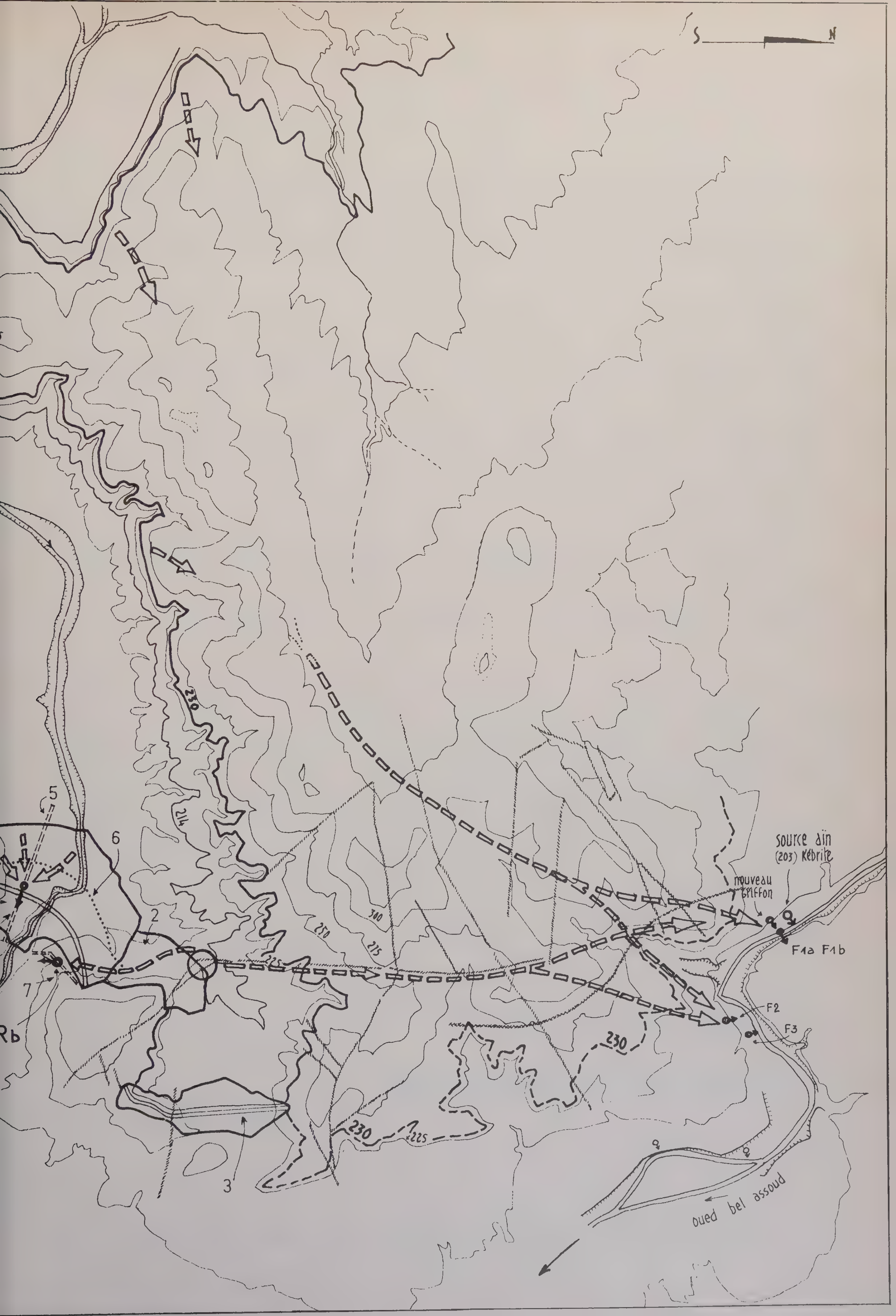
cheminement souterrain

zone suspecte dans la retenue.



1 barrage principal
2 tapis étanche
3 digues annexes
4 évacuateur de crue
5 ouvrage de prise
6 rideau d'injection
7 galerie de drainage

0 500 m.


S
N
230
214
5
6
2
7
Rb
3
300
250
275
225
230
230
225
source aïn
(203) Kébrite
nouveau
griffon
F1a F1b
F2
F3
oued bel assoud

1) Cheminement 1 : de la retenue à l'oued OHEICHE par les calcaires diaclasés lutétiens ; longueur moyenne des lignes de fuites : 400 m.

2) Cheminement 2 : circulation dans les calcaires campaniens de la zone de l'évacuateur de crue et du barrage. Deux zones de restitution peuvent être envisagées :

   2a) restitution à l'aval immédiat de l'ouvrage, rive droite et rive gauche de l'oued NEBAANA.

   2b) dans l'hypothèse où la faille F3 est le siège de circulations, des infiltrations vers le Nord en direction du lit de l'oued ASSOUD doivent être envisagées. La longueur d'un tel cheminement serait de 1 km.

3) Cheminement 3 : circulation dans les calcaires lutétiens. Les zones d'infiltrations se développent sur toute la rive gauche de la retenue (fig. 3), en particulier dans les zones hautes (entre 215 et 230). Les grands accidents, type FA, peuvent également favoriser l'infiltration de l'eau dans cette formation avant même qu'elle ne soit mouillée directement.

   Les zones de restitution possibles se développent sur toute la rive gauche entre la digue secondaire de la rive gauche et la source sulfureuse de l'AÏN KEBRITE. La longueur des cheminements peut être supérieure à 1 km.

Remarque : Il faut noter que les cheminements 2b et 3 peuvent avoir des zones de restitution communes.

3 - TRAITEMENTS - MISE EN EAU - BILAN

- Les traitements

Le voile d'étanchéité, complété en rive gauche par des tapis de surface en terre compactée, avait pour but d'éliminer les risques de fuites par les calcaires campaniens (cheminement 2a en particulier)(fig. 4). Les coupes fig. 2 et 4 montrent que le voile a été réalisé jusqu'aux marnes inférieures.

En raison de la valeur de l'eau, l'objectif du Maître d'Oeuvre était d'obtenir, après traitement, une perméabilité de 10^{-8} m/s, soit 1/10 de Lugeon.

Caractéristiques du voile :

- surface totale : 110.000 m2
- longueur de forage injecté : 100.000 m
- absorption moyenne : 130 kg/m2 de voile
- coulis stable { argile-ciment
  { bentonite-ciment
- injection par passes descendantes et reforage.

● Mise en eau - Bilan (fig. 5)

La mise en eau a débuté en août 1965. Le plan d'eau a atteint la cote 215 en été 1968. Cette cote ne fut dépassée qu'après les crues catastrophiques d'octobre 1969.

● Bilan des fuites lors de la mise en eau à la cote 215

Lorsque la cote du plan d'eau a atteint la cote 215, les fuites répertoriées étaient les suivantes :

Fuites à proximité de l'ouvrage :

- Fuites de faible importance à travers le voile (galerie de vidange) ;
- Fuites de faible importance rive gauche par contournement du voile (galerie de drainage).

Fuites à grande distance :

- Rive droite : nombreuses petites résurgences dans l'oued OHEICHE ; débit total voisin de 10 l/s ;
- Rive gauche : augmentation du débit de la source de l'AÏN KEBRITE, résurgences nouvelles à proximité.

A) Les fuites à proximité du barrage

- Les fuites à travers le voile : résurgences Ra, fig. 5. Elles sont évaluées à 0,3 l/s. La température de l'eau est voisine de 18°.
- Les fuites par contournement du voile : résurgences Rb, fig. 5. Les résurgences apparaissent dans la galerie de drainage creusée rive gauche à la cote 179. Cette galerie recoupe la faille F2 ; les fuites sont d'ailleurs apparues après la traversée de cet accident par la galerie. Le débit atteint 2 l/s ; la température de l'eau est de 19,1° C. L'origine des eaux est mal connue.

B) Les fuites à grande distance

- Rive droite, les résurgences (RC, fig. 5) de l'oued OHEICHE correspondent à des circulations à travers les calcaires diaclasés du Lutétien. L'origine des eaux et la nature des cheminements sont sans ambiguité. Les points d'émergence sont très nombreux et échelonnés sur une grande distance. Les caractéristiques de ces fuites permettent de considérer qu'une véritable nappe de fissures s'est établie dans toute l'unité des calcaires lutétiens.

  Importance des débits : le graphique fig. 4 montre que, pour un plan d'eau à 215, le débit des fuites est voisin de 25 l/s. Pour la cote 230, le débit prévu (?) est de l'ordre de 90 l/s.

  Traitements : après l'apparition des premières fuites, les principales fissures karstifiées, visibles dans la zone de la carrière, ont été mastiquées au mortier entre les cotes 211 et 215.

- Rive gauche :

a) Résurgences de l'oued BEL ASSOUD :

Le tableau ci-dessous fournit les principales caractéristiques des résurgences de l'oued BEL ASSOUD

	avant la mise en eau	pour un plan d'eau à 214
source de d'AÏN KEBRITE	source naturelle, thermale, sulfureuse Q ≠ quelques 1/s * t ≠ 30°	sulfureuse t ≠ 24° à 24,1°
F1A F1B	} n'existaient pas	sulfureuses t ≠ 23,3° C
nouveau griffon	n'existait pas	clair, sans odeur 22,2°-22,3° C
F2 et F3	n'existaient pas	F2 : t entre 20,7° et 21,4° C F3 : t entre 22,9° et 23,7° C

* température mesurée en septembre 1969

Commentaires :

- Localisation : voir plan fig. 5.
- Les sources F1A et F1B sont les exutoires d'une tranchée de drainage exécutée lors de la pose d'une conduite en bordure de la piste qui longe le lit de l'oued ; le débit de ce drain constitue la majeure partie des fuites.
- Le nouveau griffon, bien que très proche de l'ancienne source de l'AÏN KEBRITE, débite une eau claire sans odeur.
- A la même période (septembre 1969), la température des eaux du lac était comprise entre 25° C en surface et 16° C à 25 m de profondeur (à -10 m : 22° C).

b) Importance des fuites :

Le graphique fig. 4 met clairement en évidence la liaison existant entre les débits et la cote du plan d'eau de la retenue.

c) Hypothèses sur l'origine des eaux et la nature des circulations de la rive gauche :

Les fuites sont apparues dès que l'eau a atteint la cote 200 dans la retenue.

Différentes hypothèses peuvent être envisagées. On peut imaginer :

- une imprégnation générale des calcaires lutétiens de la rive gauche, les failles (FA en particulier) et les diaclases favorisant la pénétration de l'eau avant même que les formations soient directement mouillées. Les fuites correspondraient alors à l'exutoire d'une véritable nappe de fissures.
- une autre hypothèse a été également avancée : compte tenu de l'apparition des fuites avant que les eaux soient au contact des calcaires, les fuites correspondraient, dans cette hypothèse, à des cheminements privilégiés dans les failles qui disloquent l'anticlinal. Les infiltrations se produiraient à proximité du barrage, dans un petit affleurement de calcaire non recouvert par le tapis étanche.

4 - COMMENTAIRES

Il faut d'abord souligner que les débits de fuites sont faibles, en particulier les débits des fuites localisées à proximité de l'ouvrage.

Les débits des fuites à grande distance sont également peu importants en valeur absolue. Les fuites en rive droite dans l'oued OHEICHE se comprennent parfaitement et dans une certaine mesure paraissent logiques.

Les fuites vers la source de l'AÏN KEBRITE représentent, par leurs caractéristiques, le phénomène hydrogéologique le plus remarquable de cet aménagement.

La distance des circulations (1 km au minimum), la réponse immédiate à la mise en eau pour une charge de quelques mètres (gradient 4 ‰ au maximum), la karstification très faible (en surface), le rôle vraisemblablement joué (en partie tout au moins) par les cassures à calcite, forment un ensemble de caractéristiques inhabituelles.

Le gradient particulièrement faible des circulations doit, en particulier retenir l'attention ; il suggère plus, du point de vue hydrogéologique, un mécanisme impliquant une imprégnation générale du massif qu'un mécanisme impliquant des circulations par des fissures individualisées.

°
° °

Photo R. THERO

SITE DU BARRAGE DE GREOUX
Vue aérienne depuis l'amont

1 : Le site du barrage
2 : Le confluent Verdon-Collostre
3 : La série marneuse franche
4 : La série jaune
5 : La série grise
6 : Les conglomérats de Riez-Valensole

CHAPITRE

12

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Greoux

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème de l'étanchéité
- Importance régionale de la karstification

2 - Le cadre naturel

3 - Traitements - Mise en eau - Bilan

4 - Commentaires

°
° °

Figure 1 : Schéma géologique, 1 : 50 000

Figure 2 : Coupes lithologiques

Figure 3 : Carte géologique du site, 1 : 20 000

Figure 4 : Coupes structurales et voile

Figure 5 : Risques de fuites, 1 : 20 000

Photo : Le site, vue aérienne

°
° °

Bibliographie :

- Dossiers et rapports de la Division Géologie Géotechnique, inédits - Electricité de France.

RESUME

Le barrage en enrochements de GREOUX (hauteur 64 m.) est situé sur le VERDON, affluent de la DURANCE (Alpes du Sud - FRANCE).

Il est construit dans une gorge creusée dans les calcaires tabulaires du CRETACE inférieur. Ces calcaires bien stratifiés, épais de 150 m. environ, présentent une altération caractéristique qui souligne les épontes des cassures. Ils reposent sur des formations plus marneuses non karstiques, situées 50 m. sous la surface du bed-rock au droit de l'ouvrage. Des réseaux très réguliers de diaclases, ainsi que des failles à faible rejet, existent sur les deux rives. Sur la rive droite et partiellement sur la rive gauche, les calcaires sont recouverts par une épaisse couverture étanche de marnes et de conglomérats tertiaires. A l'amont immédiat du barrage, sur plusieurs centaines de mètres, les eaux mouillent des calcaires crétacés. Au-delà, les marnes sous-jacentes affleurent et constituent un tapis et des parois étanches pour la retenue. A plusieurs kilomètres à l'amont, une grande faille fait affleurer dans la retenue des calcaires jurassiques très karstifiés.

La karstification des calcaires crétacés est en grande partie fossile; de nombreuses poches d'argile compacte ont été mises à jour par les travaux; près des versants, des vides pénétrables ont été rencontrés.

Des fuites par des cheminements courts pouvaient être envisagées sur les deux rives à travers les calcaires karstiques du CRETACE; l'hypothèse de circulations à grande distance à partir des calcaires jurassiques pouvaient également être faite. L'étanchéité du rocher a été renforcée par un voile d'injection qui, sous le barrage, atteint les marnes et se poursuit sur 150 m. environ dans chaque rive. Les consommations de coulis ont été faibles au-delà des 20 premiers mètres de profondeur.

La mise en eau en 1967 n'a provoqué aucune fuite notable (quelques litres/seconde dans les galeries de drainage).

SUMMARY

The 64 metres high GREOUX rockfill dam lies on the VERDON, a tributary to the DURANCE in the southern French Alps.

It is built in a gorge cut through tabular limestones dating from the Lower CRETACEOUS. They are about 150 m thick and well bedded, with characteristic weathering of the crack walls. They overlie more marly, non-karstic formations about 50 m below the surface of the bed rock around the dam. There are very regular systems of joints and low-throw faults on both banks. The limestones are covered on the right bank and partially on the left by a thick impervious mantle of Tertiary marls and conglomerates. Immediately upstream of the dam, the lake is in contact with Cretaceous limestones, over a distance of several hundred metres. Beyond this, the underlying marls crop out and provide an impervious bottom and sides to the reservoir. Several kilometres upstream, a large fault brings highly karstified Jurassic limestones to the surface in the reservoir basin.

Karstification of the Cretaceous limestones has for the most part reached the fossile stage and many clay pockets were found during construction. Cavities big enough for a man to enter were found near the surface on the slopes.

There was a possibility of leakage occuring through short paths on both banks through the Cretaceous karstic limestones; leakage from the Jurassic limestones was also conceivable at considerable distance from the dam. The natural watertightness of the rock was backed up with a grout curtain that reaches down to the marls under the dam and extends 150 m into each bank. Grout take was low after the first 20 m depth had been passed.

Impounding in 1967 caused no marked leakage (a few litres/s in the drainage galleries).

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de GREOUX est l'ouvrage de retenue de l'aménagement de VINON. Il est situé sur le VERDON, affluent rive gauche de la DURANCE. Il a été construit par Electricité de France entre 1963 et 1967. Les études géologiques ont commencé en 1960.

● CARACTERISTIQUES DU BARRAGE ET DE LA RETENUE

Ouvrage en terre et en enrochements avec un noyau central mince argileux.
Volume total : 800.000 m3
Volume du noyau : 97.000 m3
Hauteur : 64 m - Longueur en crête : 260 m

Retenue :
Longueur maximum amont-aval (à vol d'oiseau) : 11 km
Largeur maximale : 0,6 km
Volume : 80.10^6 m3
Niveau du plan d'eau : 360 environ

Remarque : La retenue de GREOUX est une retenue à plan d'eau fixe.

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

Les eaux de la retenue du barrage de GREOUX noient des terrains de nature différente. Les terrains franchement calcaires et karstiques, sont situés d'une part à proximité du barrage et d'autre part dans la moitié amont de la cuvette, à plus de 4 km de l'ouvrage ; des formations marneuses étanches séparent ces deux zones suspectes.

Ces mêmes formations marneuses affleurent également à l'aval du barrage, limitant ainsi les zones de résurgences possibles.

● IMPORTANCE REGIONALE DE LA KARSTIFICATION

La retenue du barrage de GREOUX se développe dans une région profondément marquée par la karstification.

Il faut distinguer :

1) Une karstification ancienne (anté-miocène) dont les traces les plus spectaculaires sont les gisements de bauxite. Certaines poches ont été exploitées à quelques km au Sud de la retenue.
2) Un karst actif qui est surtout développé dans les calcaires jurassiques de la moitié amont de la retenue, où les massifs ne sont pas protégés par une couverture étanche. L'âge de ces réseaux actifs reste discuté, ils étaient déjà

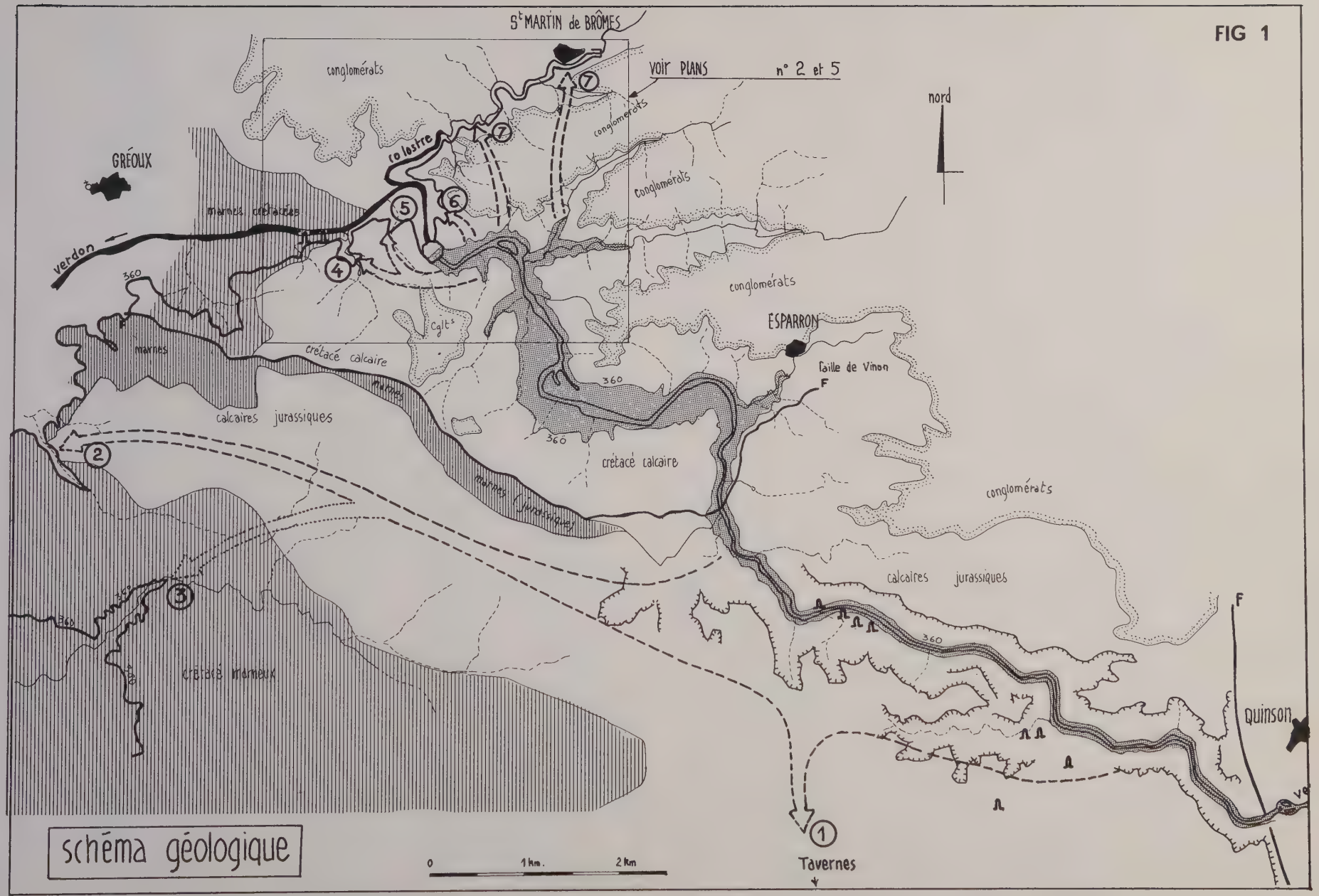


FIG 1
St MARTIN de BRÔMES
voir PLANS n° 2 et 5
nord
GRÉOUX
conglomérats
Colostre
marnes crétacées
Verdon
360
marnes
crétacé calcaire
calcaires jurassiques
Calt.s
ESPARRON
faille de Vinon
F
marnes jurassiques
crétacé marneux
Tavernes
Quinson
0
1 km.
2 km
schéma géologique

partiellement fonctionnels avant le creusement de la vallée du VERDON. Une partie est peut-être même contemporaine de la bauxite.
Dans la partie aval de la cuvette, la couverture marneuse miopliocène protège en grande partie les calcaires ; le karst actif se limite aux zones de bordure des vallées où les calcaires sont dégagés de leur couverture étanche.

2 - LE CADRE NATUREL (fig. 1)

2.1. GEOLOGIE ET MORPHOLOGIE

L'accident chevauchant de VINON (F) qui est une faille d'importance régionale (fig. 1), divise la retenue en deux unités :

- L'unité amont

Cette unité est constituée par des calcaires du Jurassique supérieur, épais de plus de 250 m (fig. 2a). Ils forment une grande unité tabulaire qui se développe vers le Sud sur plus de 10 km ; son extrémité méridionale domine la dépression de TAVERNES.

Vers l'Ouest, elle disparaît peu à peu sous les formations crétacées.

La structure de cette unité est localement très complexe; les failles et les cassures sont nombreuses, en particulier vers l'Ouest où les couches se redressent par endroits à 40°.

Le Jurassique supérieur (fig. 2) est constitué par des calcaires francs, bien cristallisés et très purs (98 % $CaCO_3$). Au sommet de la série (Portlandien), les bancs sont massifs et très épais. Sous le Portlandien, le Kimméridgien se distingue par ses bancs beaucoup plus minces (quelques décimètres d'épaisseur). Les joints entre les bancs sont toujours bien marqués et généralement soulignés par un joint marneux de quelques millimètres d'épaisseur.

- L'unité aval

Elle est constituée par les calcaires, les marno-calcaires et les marnes du Crétacé inférieur (fig. 2a, 2b).

Les calcaires et les marno-calcaires du Crétacé sont caractérisés par :

1) une pâte très finement cristallisée ;
2) une altération typique. La roche non altérée est de couleur gris bleuté ; elle devient par altération beige clair, l'altération progresse parallèlement aux épontes des fissures et des joints. A la limite, la roche présente une altération en boules caractéristique (1) ;

(1) *Ces deux caractères les différencient très nettement des calcaires jurassiques blancs, cristallisés et fragiles.*

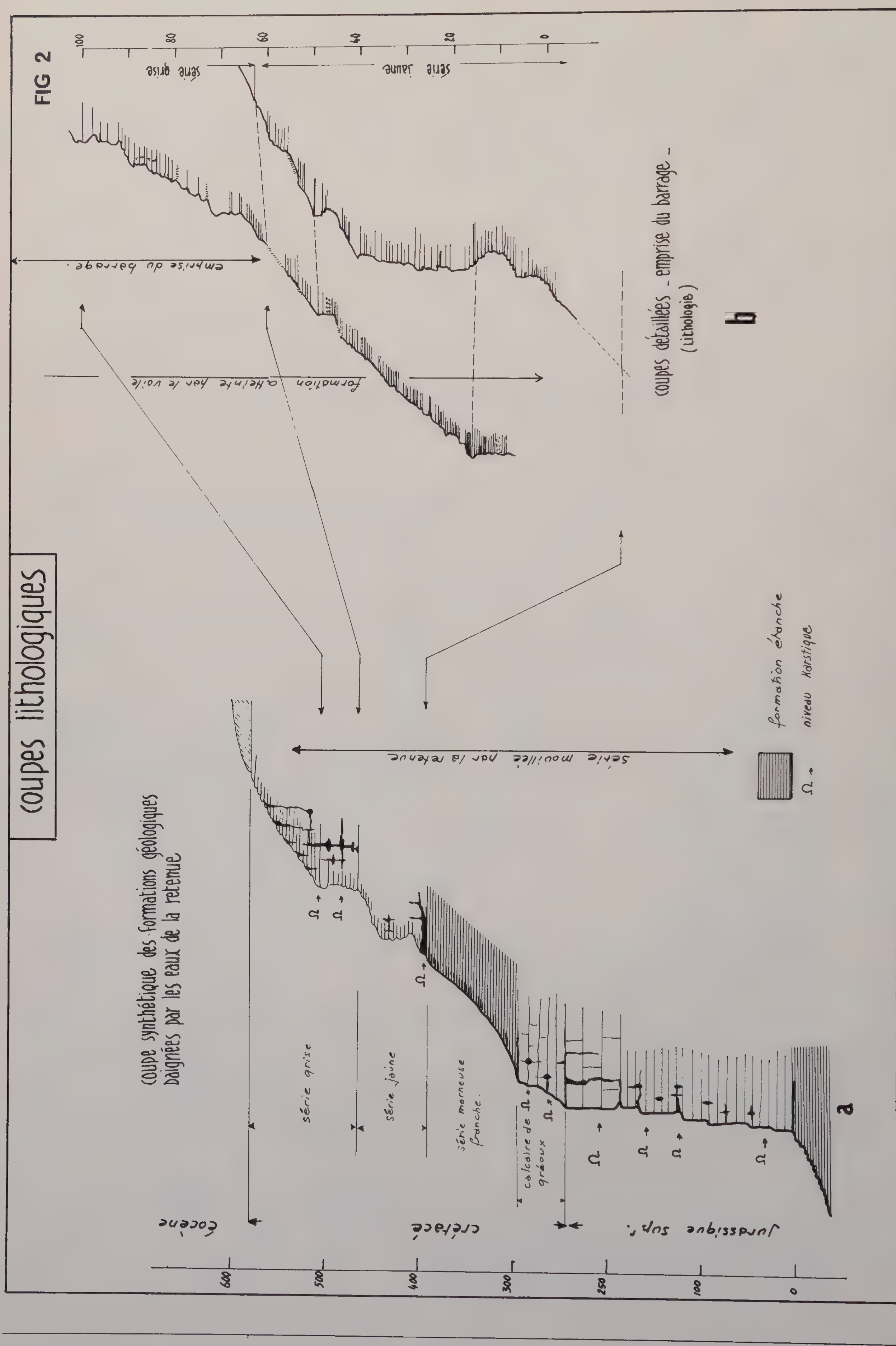


FIG 2
coupes lithologiques
coupe synthétique des formations géologiques baignées par les eaux de la retenue
éocène
crétacé
Jurassique supr.
série grise
série jaune
série marneuse franche.
calcaire de Gréoux
série mouillée par la retenue
formation étanche
niveau karstique
a
emprise du barrage.
formation atteinte par le voile
coupes détaillées _ emprise du barrage _
(Lithologie)
b

3) une grande résistance au choc et des surfaces de cassure conchoïdales.

Le Crétacé supérieur n'existe pas dans la région.

Selon sa lithologie et ses faciès d'altération (couleur et morphologie), le Crétacé inférieur (Valanginien, Hauterivien) peut être divisé en 4 séries (fig. 2) :

- à la base, reposant en concordance sur le Jurassique, les calcaires de GREOUX. Ces calcaires francs, très karstiques ont une pâte fine et le faciès d'altération bicolore (1). Ils ne jouent aucun rôle dans l'étanchéité de la retenue.
- au-dessus, la série marneuse franche, épaisseur 80 à 100 m. Ces calcaires marneux et ces marnes, très fossilifères, constituent par leur nature et l'épaisseur de la série, un niveau étanche par excellence (2) ; très altérables (gelifs), ils sont, dans la morphologie, à l'origine des talus à pente douce et des dépressions. Chaque fois que le VERDON en creusant sa vallée a atteint cette série, la vallée est large (plaine de GREOUX entre le COLOSTRE et GREOUX, vallée entre ESPARRON et le barrage).
- au-dessus des marnes, la série jaune (75 m d'épaisseur). Ces calcaires marneux en bancs de quelques décimètres ont une patine d'altération caractéristique de couleur jaunâtre. Ils peuvent dans certains cas affleurer en falaise.
- au-dessus de la série jaune, la série grise (110 m d'épaisseur). Cette série est formée de bancs bien individualisés pouvant atteindre 1 m d'épaisseur. Les joints entre les bancs ne sont pas argileux : à l'affleurement, ces calcaires sont caractérisés par une patine grise. Ils forment avec les calcaires de GREOUX les séries les plus dures et les plus karstiques du Crétacé inférieur. Ils constituent un excellent niveau repère dans le paysage.

A partir de l'Eocène, ces deux unités amont et aval ont été inégalement recouvertes par les dépôts de marnes éocènes puis par les conglomérats et les marnes de RIEZ-VALENSOLE.

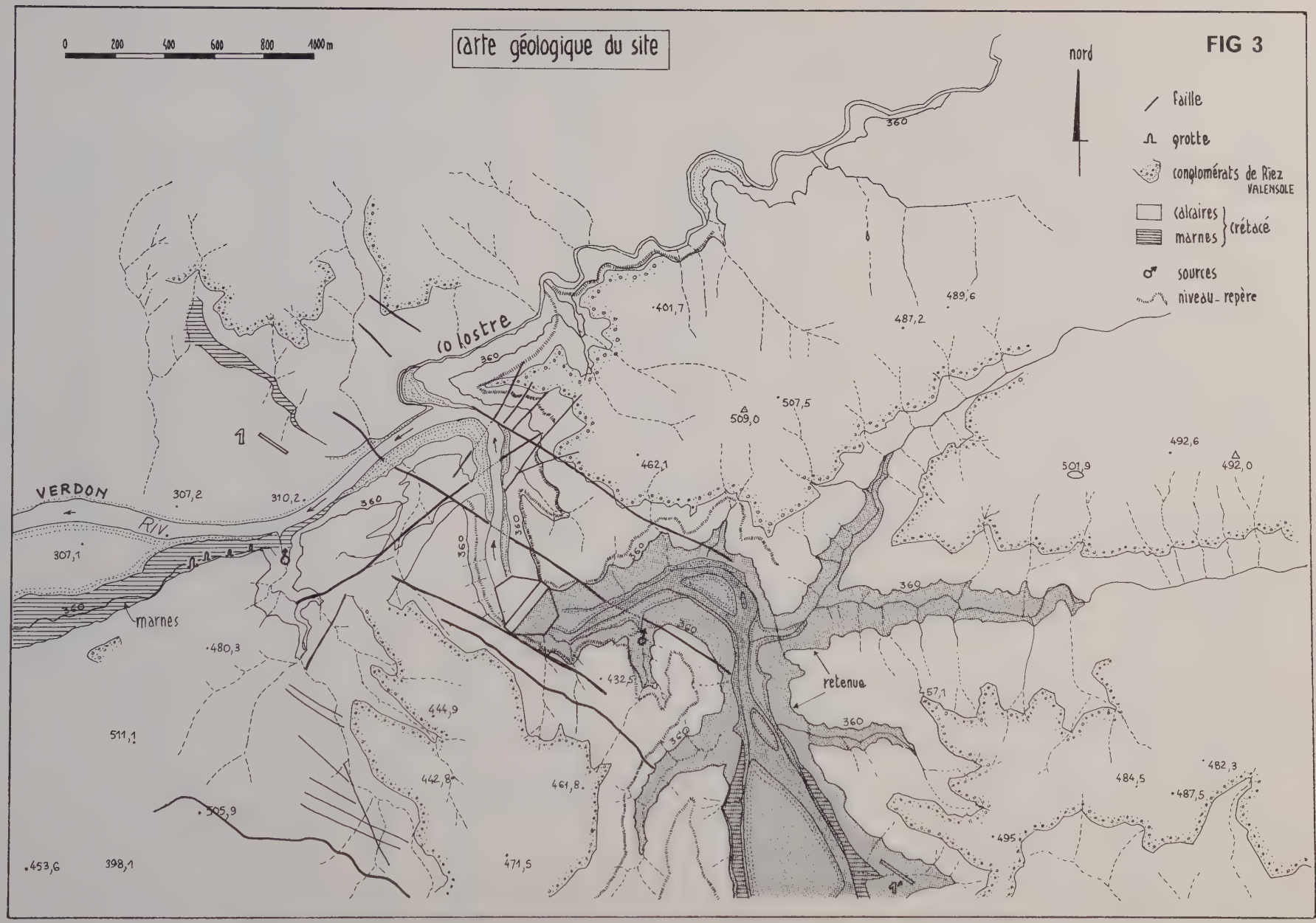
C'est au quaternaire seulement que le VERDON a creusé sa vallée actuelle, d'abord dans les conglomérats puis dans les calcaires et les marno-calcaires du Jurassique et du Crétacé.

Les différences lithologiques entre le Jurassique et le Crétacé sont à l'origine, dans la vallée du Verdon, de deux morphologies bien différentes.

A l'amont (fig. 1), entre QUINSON et la faille chevauchante de VINON, le VERDON coule au fond d'une véritable gorge aux parois verticales, creusée dans la puissante série jurassique. Dans cette zone, sur le plateau, la couverture des conglomérats n'existe plus et localement paraît même n'avoir jamais existé (en particulier sur la rive gauche et également sur la rive droite près de QUINSON).

(1) *C'est dans cette formation que sont situées les sources thermales de GREOUX-LES-BAINS.*

(2) *Remarque : ils ont fourni le matériau du noyau étanche du barrage.*


carte géologique du site
FIG 3
0 200 400 600 800 1000 m
nord
faille
grotte
conglomérats de Riez
VALENSOLE
calcaires
marnes
crétacé
sources
niveau-repère
VERDON
RIV.
marnes
retenue
360
307,2
310,2
307,1
480,3
511,1
505,9
453,6
398,1
471,5
442,8
444,9
461,8
432,5
462,1
401,7
509,0
507,5
489,6
487,2
501,9
492,6
492,0
57,1
484,5
482,3
487,5
495

A l'aval de la faille de VINON et jusqu'au confluent avec le COLOSTRE, la vallée est plus large, les barres rocheuses correspondent aux niveaux les plus calcaires du Crétacé (série grise en particulier) ; elles sont séparées par d'importants glacis, à pente raide, qui correspondent aux niveaux les plus marneux.

Au sommet sur chaque rive (fig. 1 et 3) et surtout rive droite, les conglomérats et les marnes de RIEZ VALENSOLE forment un tapis qui protège les calcaires.

- Structure et fracturation (fig. 3)

L'unité aval est affectée par des déformations souples à grand rayon de courbure. Le pendage des couches ne dépasse jamais 15°. Des accidents, failles, cassures, bien visibles sur photos aériennes, affectent cette unité sans être un caractère essentiel de la structure (fig. 3 et 4).

Les déformations structurales souples jouent un rôle important dans l'étanchéité de la retenue. En effet, selon leur amplitude , les formations suspectes sont ou non noyées par les eaux de la retenue.

Sous l'angle structural, l'emplacement du site du barrage correspond à un point singulier (fig. 4) :

Le site du barrage est en effet le seul endroit où une déformation synclinale a abaissé suffisamment la série grise pour que le VERDON ne l'ait pas complètement recoupée (1). A l'amont et à l'aval, les couches remontent, les marnes affleurent à nouveau et la vallée s'élargit.

Les principaux accidents sont portés sur la figure 3 et sur les coupes de la figure 4.

On doit distinguer (fig. 3) :

a) des accidents amont-aval, perpendiculaires à la crête du barrage (failles ou cassures F2, F2bis, F3, etc., fig. 4) ;

b) un système de cassures et de failles, situé 500 m à l'aval de l'ouvrage. Bien visibles sur la rive droite, ces accidents transverses au VERDON sont à l'origine rive gauche d'une zone déprimée, masquée par des terrains de couverture.

Sur le site du barrage, les reconnaissances ont mis en évidence deux réseaux de diaclases orthogonales et proches de la verticale. Ces réseaux sont très réguliers et bien marqués sur les deux rives.

D'une manière très générale, les discontinuités de la roche sont toujours remarquablement franches et continues dans les formations calcaires du Crétacé. Ce caractère différencie nettement ces dernières des calcaires jurassiques massifs, caractérisés au contraire par une fracturation désordonnée et sans continuité.

(1) *Le VERDON coule alors au fond d'une gorge creusée dans les calcaires de la série grise.*

2.2. LA KARSTIFICATION

- Les "karsts" du Jurassique supérieur

C'est dans cette formation géologique que se situent tous les grands systèmes karstiques régionaux, en particulier le système de FONTAINE L'EVEQUE (voir chapitre 17 : retenue du barrage de SAINTE CROIX).

En amont d'ESPARRON, dans le canyon du VERDON, de nombreuses grottes sont connues. Certaines ont été noyées lors de la mise en eau.

- Les "karsts" du Crétacé inférieur

On doit distinguer (fig. 2) :

1) les karsts de la série des calcaires inférieurs (calcaires de GREOUX), ex : grottes de GREOUX ;

2) les karsts de la série des calcaires supérieurs (calcaires du barrage).

Aucune liaison n'a pu être observée ou démontrée entre les réseaux de ces deux unités qui sont séparés par 80 à 100 m de marnes et de marno-calcaires.

- Les "karsts" de la série supérieure

Bilan des reconnaissances :

1) Une campagne de prospection a permis de localiser 52 indices entre le COLOSTRE et le village d'ESPARRON.

Tous ces indices sont situés dans la série grise. Une dizaine d'entre eux sont peut-être en liaison avec une karstification profonde plus ou moins fossile. Les autres indices sont de toute évidence le résultat d'un phénomène de peau.

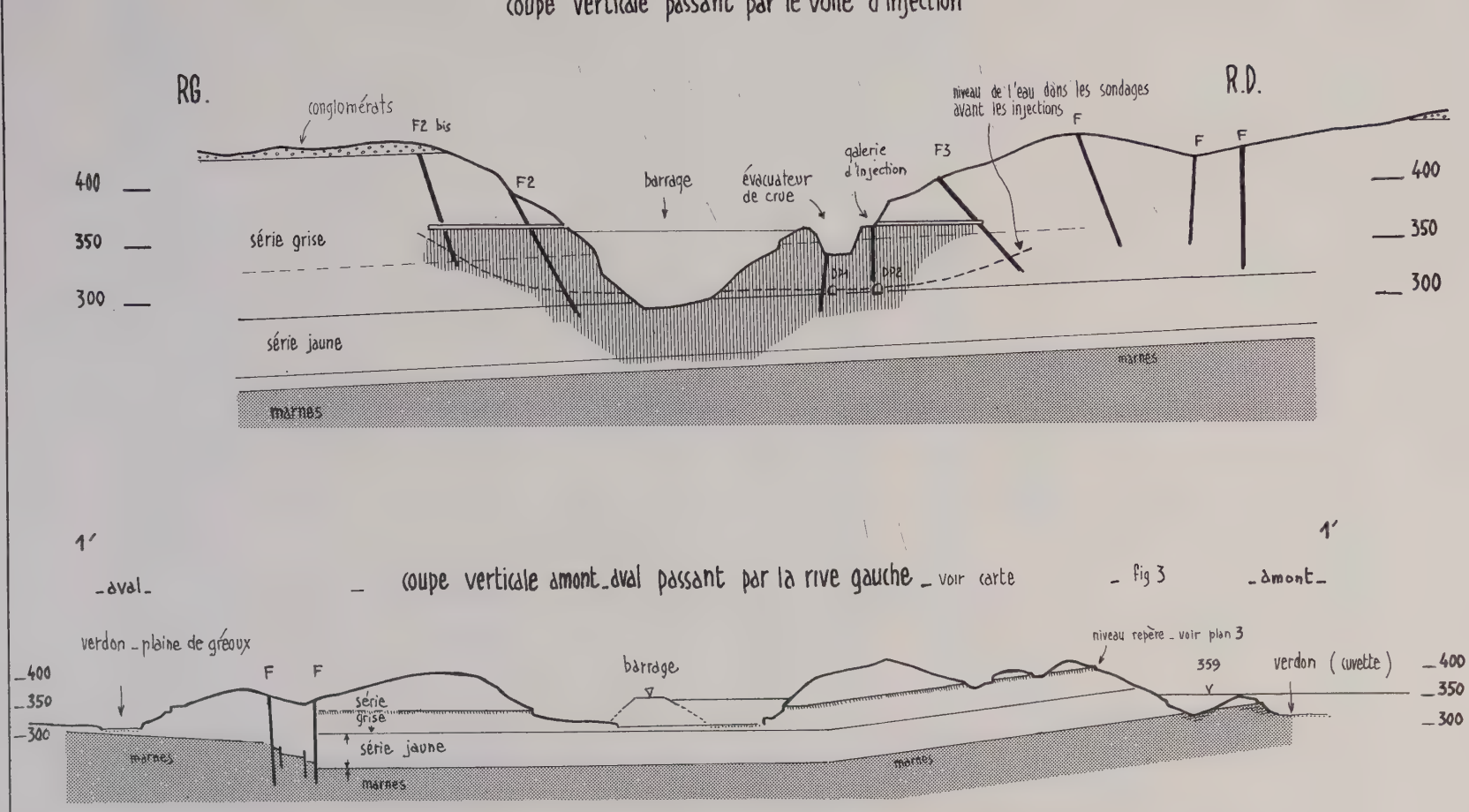
2) Les reconnaissances et les travaux sur le site du barrage ont mis à jour une karstification plus importante que prévue :

- rive gauche : 2 grottes pénétrables sur plusieurs mètres ;
- rive droite : 3 grottes pénétrables sur plusieurs dizaines de mètres et de nombreuses poches d'argile (karsts remblayés) de plusieurs dizaines de m3 ;
- par ailleurs, les failles et les cassures, à proximité des versants, sont pour la plupart élargies par dissolution. Elles jouent, notamment rive droite, un rôle primordial dans le drainage.

3) Type de karsts et remplissage : la plupart des karsts pénétrables sont des karsts de fissures (photos 9 et 10, 1ère partie). Des conduits de joints existent également mais aucun ne s'est révélé pénétrable au-delà de quelques mètres. La plupart des cavités karstiques mises à jour par les travaux étaient remblayées par des produits argileux très compacts ; ces remplissages sont localement sableux ou graveleux. Le remplissage occupe fréquemment 95 % de la cavité.

coupes stucturales et voile

FIG 4



4) Age du karst : ce karst est vraisemblablement d'âge anté-miocène ; il a été colmaté par les apports mio-pliocènes qui ont recouvert toute la région (conglomérats de RIEZ-VALENSOLE).

Au quaternaire, après le creusement du VERDON, des phénomènes locaux ont décolmaté le karst à proximité des versants, mais l'existence de la couverture formée par les conglomérats et les argiles de RIEZ-VALENSOLE a limité ces remaniements aux zones de bordure.

Il est vraisemblable que la fracturation franche et régulière du Crétacé a favorisé la création d'un karst de fissures au détriment d'un karst de joints.

2.3. HYDROGEOLOGIE

1) Entre QUINSON et GREOUX, le VERDON joue le rôle de niveau de base ; aucune perte n'a jamais été mise en évidence.

2) Les sources connues (fig. 2), en particulier la source du ravin de la MARINE (à l'aval du barrage en rive gauche dans la plaine de GREOUX), sont les exutoires de petites nappes de fissures des versants.

3) Après les pluies exceptionnelles de 1963, une venue d'eau brutale a été observée sur la rive gauche du site, à l'amont immédiat de l'ouvrage ; Q = 200 l/s durant 24 h. Le même type de phénomène s'est produit à l'aval du site du barrage en rive gauche durant le mois de février 1972, après des pluies continues supérieures à 100 mm.

4) Les piézomètres ont toujours mis en évidence des niveaux statiques supérieurs au Verdon. En rive gauche, la remontée du niveau piézométrique est rapide ; sur la rive droite, la pente piézométrique est plus faible. Cette ligne piézométrique marque en réalité la limite entre les terrains fissurés (donc bien drainés) situés près de la surface et les terrains peu fissurés sous-jacents.

3 - TRAITEMENTS - MISE EN EAU - BILAN

● TRAITEMENTS D'ETANCHEITE

Le noyau étanche du barrage a été prolongé par un voile d'injection.

Extension : voir fig. 4 .

Caractéristiques :

- sondages inclinés à 45° dans un plan vertical passant par le noyau ;
- écartement des forages primaires : 12 m ; secondaires, tertiaires : 3 m ; Dans la zone centrale, une rangée de sondages quaternaires a été nécessaire.

- coulis à C/E variable de 1/4 à 2/1
  composition des différents coulis : 1) ciment pur
  2) argile-ciment
  3) coulis avec accélérateur

- pression de 5 à 30 bars ;

- résultats des injections de la 1ère campagne (pression 0 à 30 bars) :
  absorption des primaires : 367 kg/ml
  absorption des secondaires : 457 kg/ml
  absorption des tertiaires : 462 kg/ml

Remarque : La consommation a atteint 800 kg/ml pour les 20 premiers mètres. Au-dessous, la consommation a diminué. Les circulations amont-aval de coulis ont été supérieures à 150 m. Il a toujours été difficile de contrôler le cheminement du coulis.

● LES POSSIBILITES DE FUITES - CHEMINEMENTS POSSIBLES

Le contexte géologique et la karstification ont conduit à envisager les cheminements possibles suivants :

- A partir de l'unité amont (fig. 1)

- Surface d'infiltration : 100.000 m2 ; profondeur moyenne : 15 m

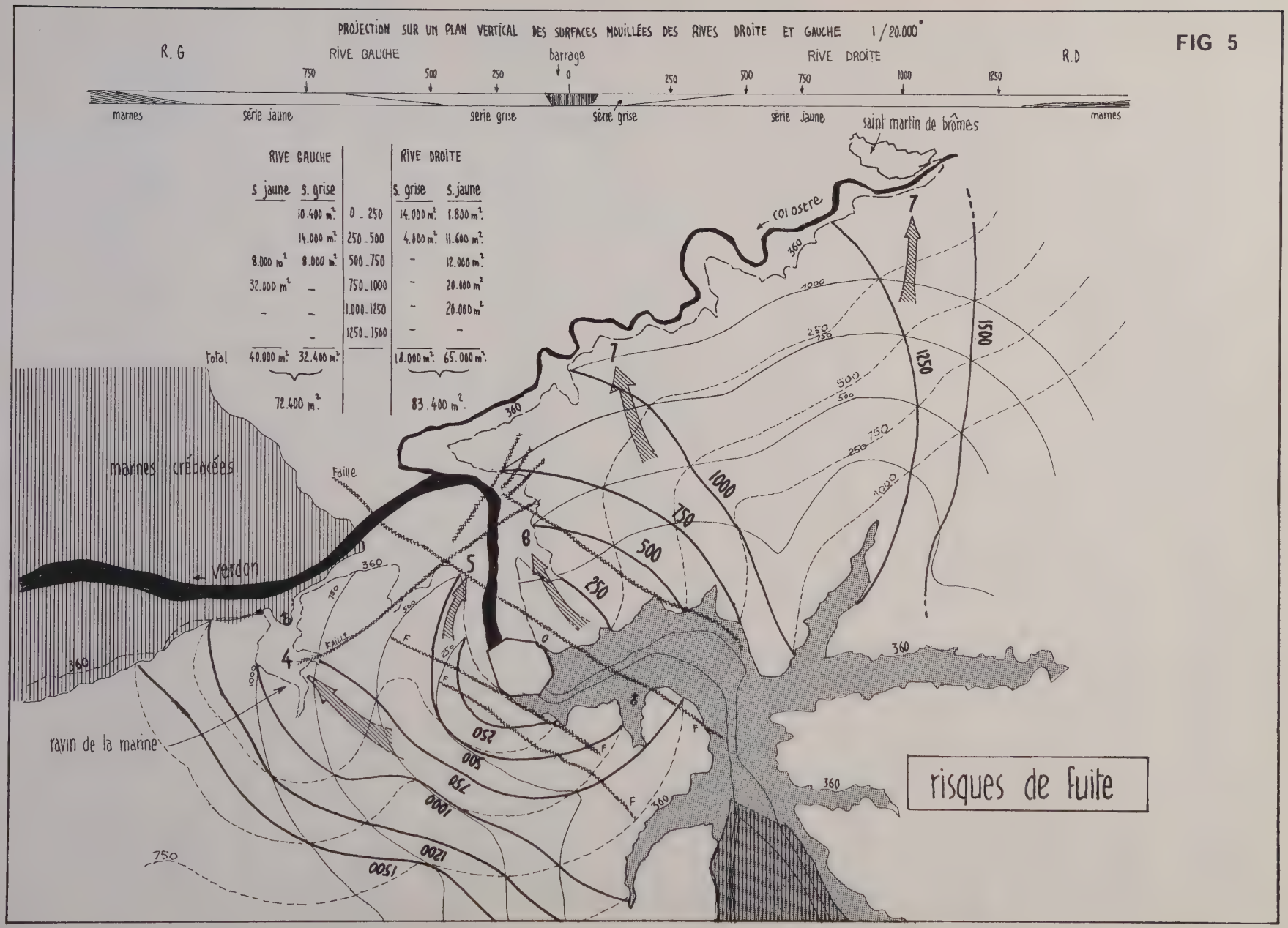
- Zones de restitution :
  hypothèse 1 : vers le Sud, zone de TAVERNES, cheminement 11 km ;
  hypothèse 2 : vers le NW, zone du ravin de ROUBEAU, tectonique complexe, cheminement minimum 7 km ; largeur de la zone de restitution : 200 m environ ;
  hypothèse 3 : vers la dépression de MALAURIE ; cette hypothèse est citée pour mémoire car elle implique la traversée du Crétacé marno-calcaire qui recouvre le Jurassique.

- A partir de l'unité aval

La figure 5 met en évidence la dissymétrie des rives. La présence du COLOSTRE et des ravins affluents fait que le périmètre de fuites 1250 est repoussé vers le Nord-Est.

- Surfaces d'infiltration : fig. 1 et 5
  série grise : surface rive droite : 18.000 m2
  rive gauche : 32.400 m2
  série jaune : surface rive droite : 65.000 m2
  rive gauche : 32.400 m2

- Zones de restitution rive gauche
  hypothèse 4 : ravin de la MARINE, cheminement minimum 1000 m ; ce cheminement implique le franchissement des failles par les circulations.
  hypothèse 5 : vallée du VERDON à l'aval du barrage, cheminement minimum 300 m (influence du voile)


PROJECTION SUR UN PLAN VERTICAL DES SURFACES MOUILLÉES DES RIVES DROITE ET GAUCHE 1/20.000
R.G
RIVE GAUCHE
barrage
RIVE DROITE
R.D
750 500 250 0 250 500 750 1000 1250
marnes
série jaune
série grise
série grise
série jaune
marnes
saint martin de brômes
RIVE GAUCHE
RIVE DROITE
S jaune S. grise
S. grise S.jaune
10.400 m² 0 - 250 14.000 m² 1.800 m²
14.000 m² 250 - 500 4.800 m² 11.600 m²
8.000 m² 8.000 m² 500 - 750 - 12.000 m²
32.000 m² - 750 - 1000 - 20.000 m²
- - 1.000 - 1250 - 20.000 m²
- - 1250 - 1500 - -
total 40.000 m² 32.400 m² 18.000 m² 65.000 m²
72.400 m² 83.400 m²
marnes crétacées
Faille
Verdon
ravin de la marine
col ostre
risques de fuite
FIG 5

- Zones de restitution rive droite
  hypothèse 6 : vallée du VERDON rive droite à l'aval du barrage, cheminement minimum 260 m (influence réduite du voile en raison de la topographie)
  hypothèse 7 : vallée du COLOSTRE, cheminement minimum 850 m.

● DISPOSITIF DE SURVEILLANCE PENDANT LA MISE EN EAU

Compte tenu des possibilités 4, 5, 6, 7, les dispositions suivantes ont été prises :

1) installation d'une station de jaugeage sur le COLOSTRE, pour mesurer l'importance des fuites éventuelles ;

2) inspection systématique des rives entre le ravin de la MARINE et SAINT MARTIN-DE-BRÔMES. L'inspection était journalière durant la montée du plan d'eau ; les contrôles plus espacés pendant les paliers de remplissage.

● BILAN DE LA MISE EN EAU - COMMENTAIRES

La mise en eau, commencée le 15 février 1967, s'est poursuivie jusqu'en avril 1967 à la vitesse moyenne de 0,5 à 2 m/jour avec des paliers (2 semaines à 327 et 1 semaine à 345).

Importance des fuites : quelques litres/seconde restitués par les galeries de drainage.

4 - COMMENTAIRES

L'absence de fuite par le Jurassique (possibilités 1, 2, 3) est sans doute liée à la structure complexe du Jurassique (ravin de ROUBEAU), à la longueur des lignes de fuites, à l'âge ancien de la karstification.

L'absence de fuite par le Crétacé (possibilités 4, 5, 6, 7) attire l'attention sur les caractéristiques suivantes : faible surface des zones mouillées (en particulier dans la série grise), colmatage important du karst, absence de karst de joints, âge ancien du karst.

o
o o

Photo G. AKERMANN

LE SITE DU BARRAGE DE VOUGLANS
Vue aérienne

1 : Site du barrage
2 : Petite faille de Cernon
3 : Source de la Porcherie
4 : Entrée de la Caborne
5 : Village de Vouglans
6 : Méandre de la Chartreuse de Vaucluse

CHAPITRE

13

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Vouglans

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Problème de l'étanchéité
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel

3 - Traitement - Mise en eau - Bilan

°
° °

Figure 1 : Carte géologique, 1 : 20 000

Figure 2 : Coupes lithologiques et structurales

Figure 3 : Périmètres de fuites, 1 : 20 000

Figure 4 : Surfaces mouillées

Photo : Le site du barrage

°
° °

Bibliographie :

- Archives et rapports de la Division Géologie Géotechnique - Electricité de France.

RESUME

Le barrage voûte de VOUGLANS (hauteur 130 m.) est construit sur l'AIN (JURA FRANCAIS).

Il est situé à la sortie aval d'une gorge sinueuse creusée dans une puissante série horizontale de calcaires et de dolomies d'âge jurassique. La première formation étanche est représentée par les marnes ARGOVIENNES situées à plus de 130 m. sous le lit de la rivière. Ces calcaires et dolomies sont mouillés par les eaux de la retenue sur de grandes surfaces. Les couches remontent de part et d'autre de la vallée formant une large gouttière synclinale à fond plat, bordée de plateaux. En raison de cette structure synclinale des calcaires, les fuites éventuelles ne peuvent ressortir que dans la vallée de l'AIN, à l'aval du barrage. De grandes failles soulignent les bords du synclinal; des failles annexes atteignent la retenue. En rive droite, une flexure très nette (la FLEXURE DE CERNON) se développe, parallèle à l'AIN, à moins d'un kilomètre de celui-ci. Les systèmes de diaclases sont en général peu développés.

Sur les plateaux, la morphologie de surface est typiquement karstique. En rive droite, près du barrage, plusieurs réseaux karstiques ont été explorés. Le plus important, LA CABORNE DE MENOUILLE, dépasse 5.000 m. de développement. Ils illustrent l'importance de la karstification régionale, en général complexe en raison des phénomènes de colmatage et de décolmatage qui ont eu lieu durant les périodes glaciaires. Le réseau de la CABORNE est actif et draine les eaux reçues par une grande partie du plateau de la rive droite de la retenue. La résurgence pérenne est la source de la PORCHERIE située 1.200 m. à l'aval du barrage.

Le voile d'injection du barrage a une extension réduite; les absorptions ont été inférieures à 105 kg par mètre linéaire de forage, ce qui confirme la faible fissuration du terrain. En rive droite, l'existence du réseau actif de la CABORNE présentait un risque de fuite important en réduisant considérablement la longueur des lignes de fuite. En rive gauche, la nature des terrains ne permettait pas d'éliminer tout risque de fuite, malgré la présence de placages morainiques étanches masquant en partie les calcaires dans la cuvette.

La mise en eau en 1968-1969 n'a pas donné lieu à des fuites importantes. On peut évaluer à 300 l/s. l'augmentation maximale du débit aux sources de la PORCHERIE. En rive gauche aucune résurgence n'a été signalée.

o o
o

SUMMARY

VOUGLANS arch dam is 130 metres high on the AIN in the FRENCH JURA.

It lies at the downstream end of a meandering gorge cut through a thick horizontal series of Jurassic limestones and dolomites. The first impervious formation is the ARGOVIAN marls more than 130 m below the river bed. Large areas of the limestones and dolomites are in contact with the reservoir water. The beds rise up either side of the valley and form a wide, flat-bottomed synclinal trough flanked by plateaux. Because of this synclinal structure in the limestones, any leakage can only escape into the AIN valley downstream of the dam. The edges of the syncline are marked by large faults, and secondary faults reach the reservoir. There is a clearly-marked flexure structure (CERNON FLEXURE) parallel to the AIN and less than 1 km from it. Fracturation systems are generally poorly developed.

The surface morphology on the plateaux is typically karstic. Several karst networks have been explored on the right bank near the dam, of which the largest, LA CABORNE DE MENOUILLE, extends over more than 5000 m. They illustrate the extent of regional karstification which is generally complex because of cloggings and decloggings of the pipes in the glacial periods. The CABORNE net is still active and is fed by water from much of the plateau on the right bank of the reservoir. The perennial resurgence is the PORCHERIE spring 1200 m downstream of the dam.

The grout curtain at the dam is small. Grout take was less than 105 kg per linear metre of drill hole, which confirms that the ground is only slightly fracturated. The active CABORNE system on the right bank was a risk of major leakage because the potential leakage paths were considerably shortened through it. It was impossible to eliminate all risk of leakage on the left bank despite the layers of impervious glacial moraine partly covering the limestones in the reservoir.

The reservoir was filled in 1968-1969 and there was no major leakage, the maximum increase in discharge from the PORCHERIE spring being estimated at 300 litres/s. No resurgence was found on the left bank.

FIG 1
la Foulatière (aven)
FLEXURE DE CERNON
Chartreuse de Vaucluse
AIN
galerie de reconnaissance
GRANDE FAILLE DE CERNON
PETITE FAILLE DE CERNON
réseau de la Caborne
trou blanc
trou guy
Caborne (entrée)
MENOUILLE
Sources de la Porcherie
alluvions
VOUGLANS
résurgence de vouglans
calcaires
lapiaz
FAILLE DE VAUCLUSE
FAILLE
0
200 m
1km

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Avec 600 millions de m3 de capacité, la retenue du barrage de VOUGLANS est le deuxième réservoir artificiel de FRANCE.

Le barrage de VOUGLANS est situé sur l'AIN, affluent rive droite du RHONE ; il a été construit par Electricité de France entre 1964 et 1969.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage voûte à double courbure
Hauteur : 130 m sur les fondations - Longueur en crête : 425 m
Cote en crête : 429 NGF
Volume : 545.000 m3 de béton

Retenue :
Longueur aval-amont : 35 km
Largeur moyenne : 350 m
Capacité : 600.000.000 m3

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE

L'intérêt présenté par la retenue de VOUGLANS réside dans la hauteur exceptionnelle de l'ouvrage et dans l'existence d'importants réseaux karstiques situés dans le plateau calcaire qui constitue la rive droite de la retenue. Le problème des fuites est limité aux zones proches du barrage ; une structure géologique favorable garantit l'étanchéité de la partie amont de la cuvette.

● LA KARSTIFICATION REGIONALE

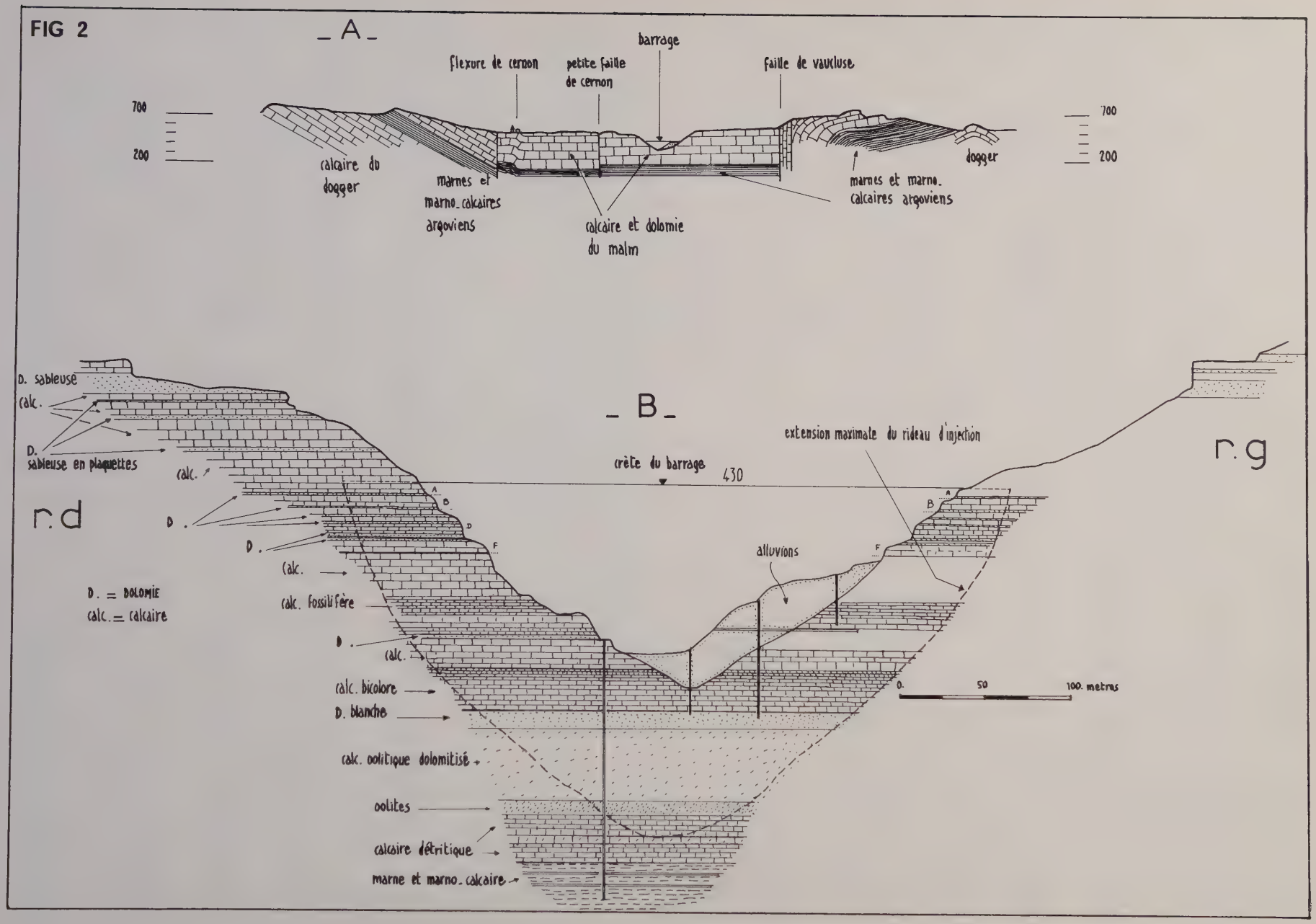
Les puissantes séries calcaires du Jurassique ont favorisé la karstification ; pour le seul département du JURA, 850 grottes et avens étaient recensés en 1966 (1).

L'histoire de la karstification jurassienne est complexe. Dans bien des cas, les réseaux karstiques, aujourd'hui fonctionnels, sont des karsts anciens, rajeunis au quaternaire.

Dans le JURA, l'époque quaternaire a été marquée par deux périodes glaciaires et par des mouvements tectoniques. Ces phénomènes ont eu 3 conséquences :

(1) *Voir première partie : chapitre 1.*

FIG 2


_ A _
barrage
flexure de cernon
petite faille de cernon
faille de vaucluse
700
200
calcaire du dogger
marnes et marno-calcaires argoviens
calcaire et dolomie du malm
dogger
marnes et marno-calcaires argoviens
700
200
_ B _
D. sableuse
calc.
D. sableuse en plaquettes
r.d
r.g
crête du barrage
430
extension maximale du rideau d'injection
alluvions
D. = DOLOMIE
calc. = calcaire
calc. fossilifère
calc. bicolore
D. blanche
calc. oolitique dolomitisé
oolites
calcaire détritique
marne et marno-calcaire
0
50
100 mètres

1) un remplissage par des dépôts glaciaires (moraines, sables, argile) de certaines vallées et un colmatage important des réseaux karstiques ;

2) des variations du niveau de base des rivières ;

3) un régime très variable des apports pluviométriques.

Ces faits expliquent la complexité des réseaux karstiques : galeries partiellement colmatées, galeries noyées, nouveaux exutoires, etc.

2 - LE CADRE NATUREL

La retenue se développe sur 35 km à l'amont du barrage. Toutes les formations mouillées par les eaux ne posent cependant pas un problème d'étanchéité pour la retenue.

Les zones suspectes, c'est-à-dire les zones de la cuvette où les eaux infiltrées sont en mesure d'alimenter des cheminements continus vers l'aval, sont les versants de la cuvette et le lit de la rivière de la zone située à l'aval de la faille de VAUCLUSE. Cette faille, bien visible en rive gauche (fig. 1), traverse l'AIN à 4 km à l'amont du barrage.

A l'amont de la faille de VAUCLUSE, les zones noyées sont, soit constituées par des formations étanches, soit, lorsqu'elles sont calcaires, sans exutoire possible en raison de la structure géologique.

2.1. MORPHOLOGIE

Dans la zone suspecte, l'AIN coule à la cote 330 environ au fond d'une gorge aux parois raides, creusée dans un plateau calcaire dont l'altitude moyenne est de 550 environ.

La vallée a été creusée par l'érosion fluviatile. Le méandre de la CHARTREUSE ne peut, en effet, être le résultat d'une érosion glaciaire.

Actuellement, l'AIN coule sur un tapis d'alluvions de 30 m d'épaisseur. Des matériaux de même nature (argilo-graveleux) forment également, sur la rive gauche, d'épais placages qui atteignent la cote 390 (voir coupe B, fig. 2).

2.2. GEOLOGIE

- Stratigraphie, lithologie, pétrographie

La coupe B (fig. 2) montre la régularité des couches du Malm dans lesquelles l'AIN a creusé sa vallée.

La série est constituée essentiellement par des calcaires et des dolomies. Cette coupe est caractéristique de toute l'unité située entre le barrage et la faille de VAUCLUSE.

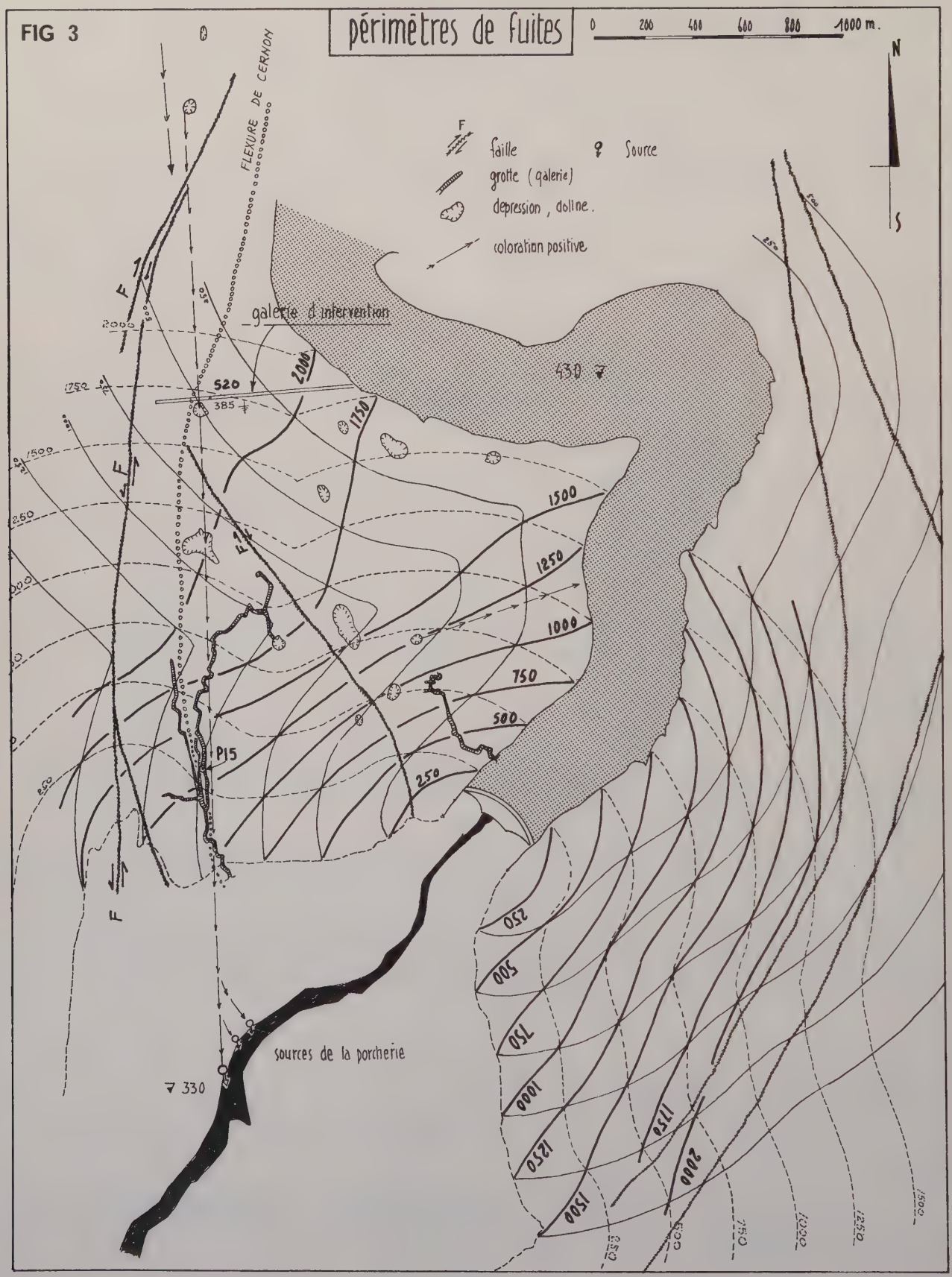


FIG 3
périmètres de fuites
0 200 400 600 800 1000 m.
N
S
FLEXURE DE CERNON
F
faille
Source
grotte (galerie)
depression, doline.
coloration positive
galerie d'intervention
520
385
430
2000
1750
1500
1250
1000
750
500
250
P15
sources de la porcherie
330

La roche est compacte, dure, brisante (1).

- Structure, fracturation

La coupe A (fig. 2) est une coupe schématique passant par le barrage. Cette coupe est caractéristique de toute l'unité suspecte. Elle montre clairement que l'AIN coule dans une gouttière calcaire en structure synclinale. La remontée des marnes argoviennes sur les deux rives, à des cotes supérieures à celles du plan d'eau, interdit d'envisager des cheminements karstiques vers d'autres vallées.

Les fuites possibles à partir de la retenue ne peuvent donc être que le résultat de circulations dans les calcaires, parallèlement à la rivière et ressortant dans la vallée de l'AIN, à l'aval du barrage.

Les principaux accidents (fig. 1 et 2) sont :

- rive droite : la grande faille de CERNON, la petite faille de CERNON, la flexure de CERNON ;
- rive gauche : la double faille de VAUCLUSE.

Tous ces accidents sont sensiblement verticaux. Dans le détail, ils sont relativement complexes.

Rive droite, le plateau calcaire est découpé par deux réseaux de cassures verticales, orientées N 100°E et N 160°E.

2.3. LA KARSTIFICATION LOCALE

L'indice karstique le plus spectaculaire est le réseau de "LA CABORNE DE MENOUILLE", situé en rive droite (fig. 1). Avec 5,6 km de galeries connues, la CABORNE DE MENOUILLE est l'un des trois plus grands réseaux karstiques du JURA français (2).

Les galeries principales,dans leur partie explorée,se développent sensiblement sur la flexure de CERNON. Elles s'enfoncent sur environ 1 km (en ligne droite) à partir de l'entrée. Des circulations pérennes sont observables dans le réseau (cote 375) ; les eaux rejoignent l'AIN aux sources de la PORCHERIE qui sont situées à l'intersection de la flexure de CERNON et de la vallée de l'AIN.

(1) *Elle s'est révélée impropre à la fabrication des granulats pour les bétons.*

(2) *Avant les travaux du barrage, le réseau de la CABORNE était connu sur 1 km environ. L'ampleur des moyens engagés pour l'exploration a permis de découvrir plus de 4 km de galeries vierges. Il est fort probable que le même effort mené dans d'autres réseaux aurait produit le même résultat. Le classement actuel de la CABORNE est donc flatteur ; on doit considérer que la CABORNE appartient aux 20 plus grands réseaux connus du JURA.*

Deux autres réseaux karstiques ont été découverts et explorés : le trou GUY (longueur 650 m, cote de l'entrée 424) est un conduit peu ramifié remontant ; le trou BLANC (cote de l'entrée 375) a été exploré sur 112 m.

En outre, de nombreux petits orifices karstiques, fonctionnels après les pluies importantes, ont été décelés sur les parois de la rive droite.

La majeure partie des ouvertures karstiques est calée sur les bancs dolomitiques ; le tracé des conduits suit en général des fissures verticales.

Sur le plateau de CERNON, les dépressions fermées sont nombreuses. Dans le cadre des reconnaissances, certaines dolines ont été partiellement vidées de leur remplissage. A partir de 5 m de profondeur, des galets de roches cristallines sont mélangés aux éléments calcaires. Ils représentent les apports des glaciers quaternaires.

Ce réseau a été décrit en détail dans la première partie, chapitre 2 et chapitre 3 ; voir également photos 11 et 18.

Rive gauche, par contre, malgré l'existence d'un lapiaz très évolué sur le plateau, aucune cavité n'a été repérée.

Sur cette rive, à l'aval du site du barrage, la source de VOUGLANS, qui apparaît comme symétrique des sources de la PORCHERIE par rapport à l'AIN, est le seul indice karstique important ; son exploration (en plongée) n'a pu être faite que sur quelques dizaines de mètres.

2.4. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

L'AIN joue le rôle de niveau de base régional. A la hauteur de VOUGLANS, le bassin versant amont est de 1150 km.

Sur les plateaux, les écoulements de surface sont toujours exceptionnels ; la restitution des eaux est assurée en totalité par les écoulements souterrains.

Rive droite (fig. 1 et 3) :

Les sources de la PORCHERIE, exutoire du réseau de la CABORNE, ont un débit moyen supérieur à 100 l/s.

Les colorations ont montré que l'impluvium contrôlé par ces sources s'étend au-delà du plateau de CERNON, au minimum jusqu'à la doline d'ONOZ, située 8 km au Nord (coloration positive).

Si on admet que le collecteur principal du réseau est localisé sur la flexure de CERNON (hypothèse vérifiée dans la partie explorable de la CABORNE), il passe donc très près de la gorge de l'AIN, à la hauteur du coude de la CHARTREUSE.

Sauf en période de crues, les sources de la PORCHERIE assurent pratiquement le drainage de toute la rive droite de l'AIN, située entre le barrage et la CHARTREUSE DE VAUCLUSE. En période de crues, une partie des apports rejoint directement l'AIN : écoulements de surface, sources intermittentes (trou GUY, trou BLANC).

Pendant les crues, au niveau du P15, situé à 1100 m à l'amont des sources, le réseau de la CABORNE peut se mettre en charge jusqu'à la cote 390, si les apports sont importants.

Actuellement, pour une cote du plan d'eau de la retenue supérieure à 410, la piézométrie s'établit à la cote 385 dans le sondage S20 (fig. 3), situé 3 km à l'amont des sources. Dans l'hypothèse où ce sondage est en relation directe avec le réseau amont de la CABORNE, cela signifierait que les apports en provenance de la retenue provoquent une mise en charge du réseau jusqu'à la cote 385.

Rive gauche :

Le régime de la résurgence de VOUGLANS n'a pas fait l'objet d'études particulières. Son bassin versant n'est pas localisé.

3 - TRAITEMENT - MISE EN EAU - BILAN

● Traitement d'étanchéité

Le barrage a été prolongé par un voile d'injection. Le voile n'a pas atteint les marnes argoviennes situées 140 m environ sous le bed-rock.

Caractéristiques du voile :

- voile incliné vers l'amont ;
- profondeur 80 m (sondages de 80 m et sondages de 40 m alternés) ;
- injection remontante, pression maxi. 30 bars ;
- consommation 45 kg/m2 ou 105,9 kg m/l.

● Travaux préventifs

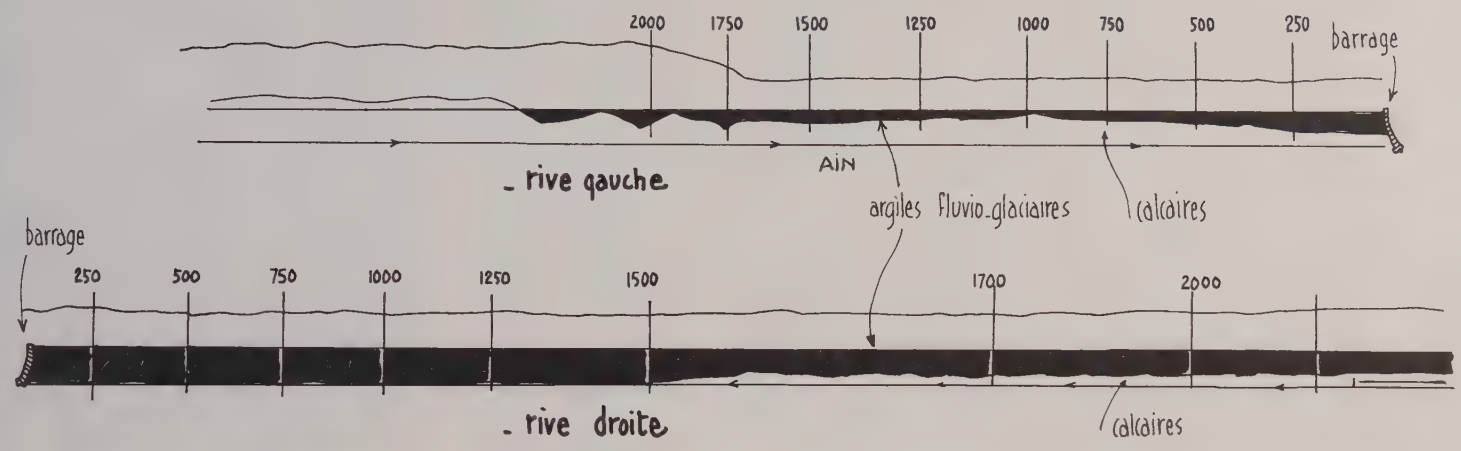
Afin d'être en mesure d'intervenir rapidement, en cas de fuites canalisées par le réseau de la CABORNE, une galerie d'intervention a été creusée en rive droite (fig. 3). Cette galerie, longue de 1000 m, calée à la cote 430, se développe jusqu'à la verticale de la flexure de CERNON. Elle était destinée à permettre un traitement rapide de la zone de la flexure où, selon les hypothèses, se développe, en amont du réseau exploré, la partie inconnue de la CABORNE.

Toujours dans ce but, des sondages espacés de 2,5 m ont été forés depuis cette galerie jusqu'à la cote 300, dans la zone de la flexure.

● LES POSSIBILITES DE FUITES - LES CHEMINEMENTS POSSIBLES

L'absence de formations étanches et la structure horizontale ont pour conséquence que, rive droite et rive gauche, tous les terrains situés à l'aval de la faille de VAUCLUSE sont suspects.

FIG 4



r. g

surfaces mouillées cumulées	surfaces mouillées partielles
19.200 m²	19.200 m²
29.600 m²	10.400 m²
36.800 m²	7.200 m²
41.200 m²	4.400 m²
47.200 m²	6.000 m²
55.200 m²	8.000 m²
62.400 m²	7.200 m²
67.200 m²	4.800 m²
	67.200 m²

r. d

	surfaces mouillées partielles	surfaces mouillées cumulées
0 - 250	20.000 m²	20.000 m²
250 - 500	27.000 m²	47.000 m²
500 - 750	27.000 m²	74.000 m²
750 - 1000	28.000 m²	102.000 m²
1000 - 1250	30.000 m²	132.000 m²
1250 - 1500	40.000 m²	172.000 m²
1500 - 1750	80.000 m²	252.000 m²
1750 - 2000	432.00 m²	295.200 m²
	295.200 m²	

surfaces mouillées

● Zones d'infiltrations (fig. 3 et 4)

- Rive droite : toute la rive est suspecte. Par ailleurs, compte tenu de la morphologie de la vallée, l'allongement des lignes de fuites, quand on s'éloigne du barrage, reste extrêmement lent.

- Rive gauche : les formations fluvio-glaciaires tapissent le versant jusqu'à la cote 390 environ et constituent ainsi un tapis qui peut être considéré comme étanche. Par leur présence, ces formations réduisent donc d'autant les surfaces mouillées suspectes, en particulier dans les zones où les cheminements étaient les plus courts.

Cette dissymétrie des deux rives est bien visible sur la figure 4.

● Zones de résurgences

Bien qu'il n'y ait pas d'écran étanche, les zones de résurgences sont cependant limitées. En effet, rive droite, la faille de CERNON, et rive gauche, la faille de VAUCLUSE, jouent l'une et l'autre soit un rôle d'écran, soit un rôle de drain et, dans les deux cas, rabattent ainsi vers le versant les cheminements souterrains éventuels.

- Dispositifs de surveillance de la mise en eau

. Station de jaugeage sur les sources aval.
. Piézomètre dans la CABORNE au P15.
. Piézomètre dans la galerie d'intervention.
. Inspection des zones de résurgences.

● BILAN

La mise en eau a commencé en avril 1968. Le 29 décembre 1969, le plan d'eau atteignait la cote 429 (cote maximale).

Les fuites peuvent être évaluées comme suit :

1) à travers le voile de drainage : 3 l/s ;
2) par le réseau de la CABORNE : 300 l/s.

Remarque : La difficulté de mesurer les débits aux sources de la PORCHERIE n'a pas permis d'analyser dans le détail l'évolution du régime des fuites en fonction de la cote de la retenue.

°
° °

CHAPITRE

14

LES RETENUES DES BARRAGES DE Ceyrac ET DE Conqueyrac (France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractères généraux du karst nord-montpelliérain

2 - Le cadre naturel

- Géologie
  Lithologie
  Structure et tectonique
  La karstification
  L'hydrogéologie
    Le système karstique de la source de SAUVE
    Nature et type du drain souterrain

Le barrage de CEYRAC

Le barrage de CONQUEYRAC

°
° °

Figure 1 : Plan de situation - Piézométrie

Figure 2 : Géologie 1 : 80 000 - Karstologie

Figure 3 : Lithologie et structure

Figure 4 : Hydrogéologie

RESUME

Les barrages de CEYRAC sur le RIEUMASSEL, affluent du VIDOURLE, et de CONQUEYRAC (en projet) sur le VIDOURLE sont des ouvrages destinés à éviter les crues catastrophiques du VIDOURLE qui est une des principales rivières des Causses Nord-Montpellierains.

Situées à quelques kilomètres l'une de l'autre, ces retenues se développent dans le même cadre géologique et hydrogéologique qui est celui du bassin d'alimentation de la grande source karstique de SAUVE, située quelques kilomètres à l'aval. Cette source est l'une des cinq plus importantes sources des Causses Nord-Montpellierains. A l'amont de cette source, le VIDOURLE et le RIEUMASSEL ne sont pas des rivières pérennes.

L'histoire de la karstification de cette région est complexe; elle commence au MIOCENE, se poursuit au PLIOCENE puis au QUATERNAIRE. Plusieurs phases de karstification ont pu être distinguées; au QUATERNAIRE, de nombreux systèmes qui sont encore actifs aujourd'hui, ont été noyés par la remontée du niveau de la mer.

En amont de la source de SAUVE, les bassins du VIDOURLE et du RIEUMASSEL sont creusés dans les marno-calcaires du CRETACE INFERIEUR et dans les calcaires du JURASSIQUE. Les bassins ont des limites Nord et Sud nettes; à l'Est une grande faille limite l'extension des calcaires jurassiques et explique la situation de la source de SAUVE. Dans toute cette région, le caractère le plus marquant est l'absence presque totale de circulation de surface. La puissance de la série calcaire jurassique dépasse 500 m., celle des marno-calcaires crétacés 250 m. Ces séries constituent une grande structure monoclinale plongeant légèrement vers l'Ouest; ceci explique la disparition des calcaires jurassiques vers l'Ouest. Des failles, très nettes remontent localement à l'affleurement, ces mêmes calcaires.

La karstification est intense; le lapiaz est très développé sur les calcaires jurassiques; les avens sont nombreux; dans les marno-calcaires, on connait de nombreuses pertes et des résurgences temporaires. 60 % des apports naturels de cette région alimentent la source de SAUVE.

Les avens constituent de nombreux regards sur la zone noyée. Sur le site de CONQUEYRAC, la nappe karstique remonte, en période de pluies, jusqu'à la surface du sol. A CEYRAC par contre, la nappe plus profonde ne remonte jamais jusqu'à la surface. Les observations hydrogéologiques et karstologiques conduisent à penser que les écoulements souterrains sont assurés par quelques réseaux de grande taille. Les rapports de ces réseaux avec les zones fissurées de surface qui contrôlent l'enfouissement des eaux sont complexes.

°°°

SUMMARY

CEYRAC dam on the RIEUMASSEL, a tributary to the VIDOURLE, and CONQUEYRAC dam on the VIDOURLE now in the design stage, are intended to prevent the disastrous floods that occur in the VIDOURLE, which is one the main rivers in the North-Montpellieran Causses District.

The sites are only a few kilometres from each other and both involve the same geological and hydrogeological context, i.e the basin feeding the large karstic spring at SAUVE a few kilometres down the river. This is one of the five largest springs in North-Montpellieran Causses district. Upstream of SAUVE spring, the VIDOURLE and RIEUMASSEL flows are seasonal.

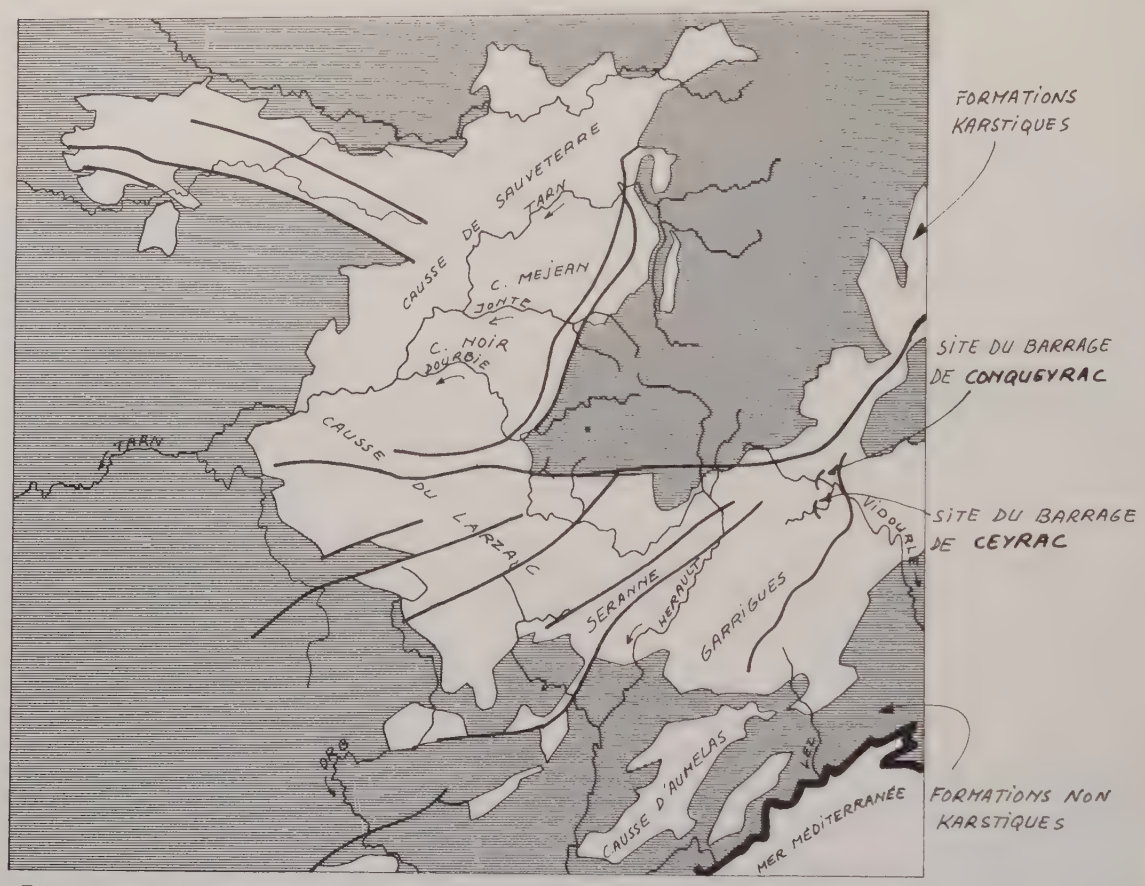
The area has a complex karst history. It begins in the MIOCENE and continues through the PLIOCENE and the QUATERNARY. Several phases can be distinguished. In the QUATERNARY, many systems that are active to-day were submerged when the sea level rose.

Upstream of SAUVE spring, the VIDOURLE and RIEUMASSEL basins lie in LOWER CRETACEOUS marly limestones and JURASSIC limestones. The northern and southern boundaries of these basins are clearly marked. To the east, the Jurassic limestones come to an end at a large fault which explains the position of SAUVE spring. The most salient feature throughout the region is the almost complete absence of any surface flow. The limestone series is more than 500 m thick, and the Cretaceous marly limestones are 250 m thick. These series form a large monoclinal structure dipping slightly westwards, which explains the disappearance of the Jurassic limestones to the west. The same limestones are sometimes brought to the surface locally by well-marked faults.

The karstificaton is intense. Grikes are very numerous in the Jurassic limestones. Pot holes are frequent. Many temporary resurgences and swallow holes exist in the marly limestones. Sixty per cent of the natural inflow in this area feeds SAUVE spring.

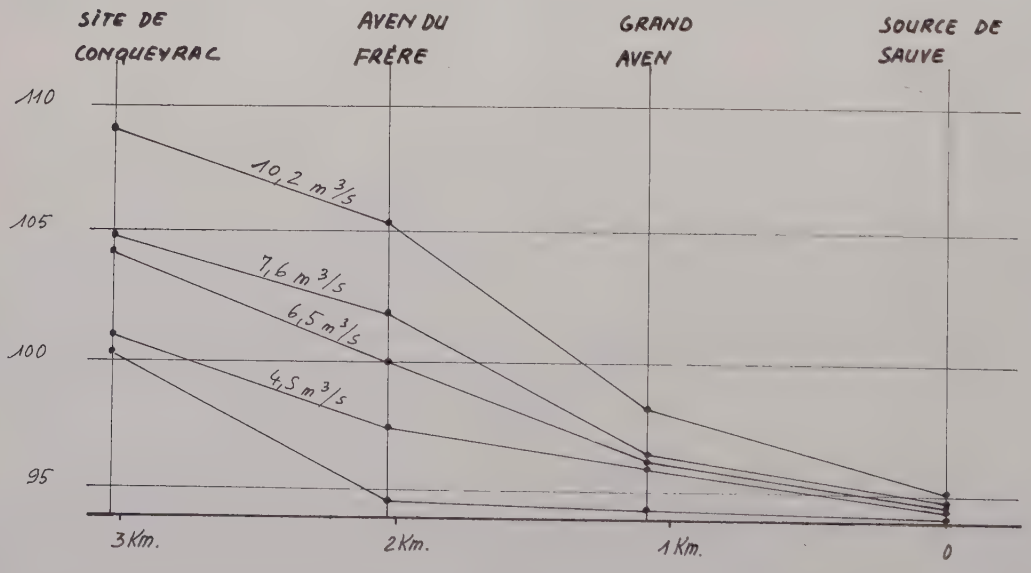
The submerged zone can be inspected at many points through pot holes. At CONQUEYRAC site, the underground water level rises in times of rain up to the surface. At CEYRAC on the other hand, the water level is lower and never rises to the ground surface. Hydrogeological and karstological observation indicates that underground flow passes through a few large networks. The relationship between these systems and the surface fractured zones controlling the infiltration of the water is complex.

FIG 1



BARRAGES DE CEYRAC ET DE CONQUEYRAC_PLAN DE SITUATION

D'APRES LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FRANCE – REGION NORD-MONTPELLIÉRAINE PAR H. PALOC – MÉMOIRE DU B.R.G.M N° 50.



PIÉZOMETRIE DES NIVEAUX D'EAU SOUTERRAINS POUR DIFFÉRENTS DÉBITS À LA SOURCE DE SAUVE. REMARQUE : LES DISTANCES ENTRE LES DIFFÉRENTS REGARDS SONT LES DISTANCES A VOL D'OISEAU ; LES DISTANCES RÉELLES NE SONT PAS CONNUES.

Bibliographie :

- AVIAS J. (1969) : Barrages en terrain karstique : l'exemple du barrage de CEYRAC (GARD).
Recherches méditerranéennes - Etudes et travaux de "MEDITERRANEE" n° 7.

- DROGUE C. (1964) : Etude hydrogéologique des principales résurgences de la région nord-montpelliéraine.
Mémoires du Centre d'Etudes et de Recherches Hydrogéologiques (C.E.R.H.) - Tome 1 - Pages 61 à 121.

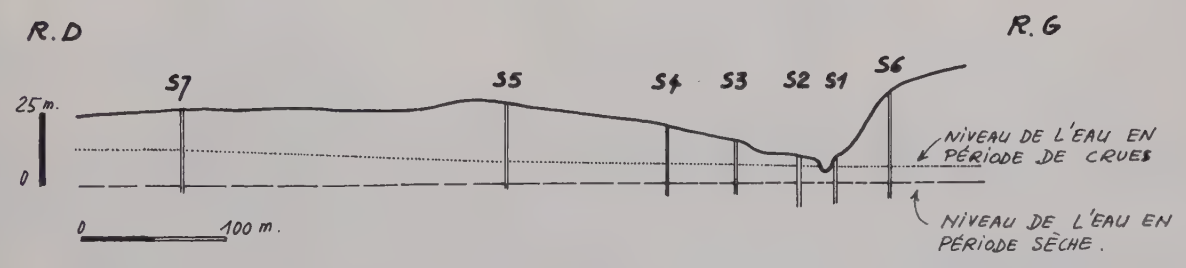
- DROGUE C. et PUECH J.P. (1970) : Reconnaissances géologiques et hydrogéologiques pour la construction de barrages en terrains calcaires.
Exemples des barrages écrêteurs de crues du HAUT VIDOURLE (GARD - FRANCE).
Terres et Eaux - Vol. XXIII - n° 65 - 4TRI - Pages 10 à 22.

- DUBOIS P. (1969) : Sur la morphologie et l'évolution souterraine de la région calcaire nord-montpelliéraine.
Etudes et travaux de "MEDITERRANEE" n° 7.

- PALOC H. (1967) : Carte hydrogéologique de la FRANCE - Région karstique nord-montpelliéraine - Notice explicative.
Mémoires du B.R.G.M. n° 50 - 229 pages et planches.

°
° °

FIG 1 *(SUITE)*



SITE DE CONQUEYRAC - PIÉZOMÉTRIE - POUR FACILITER LA LECTURE, LES HAUTEURS SONT MULTIPLIÉES PAR DEUX.

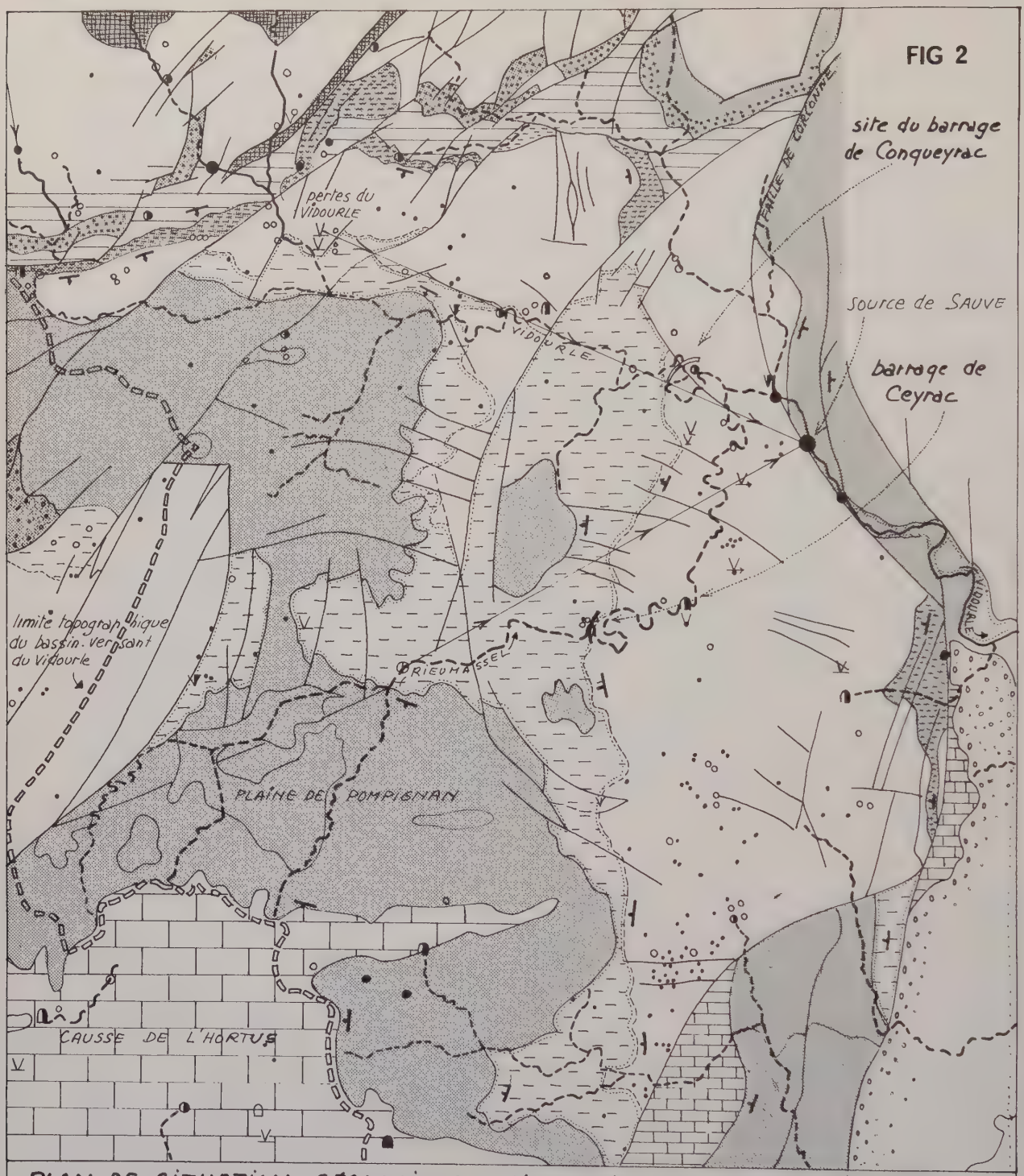


FIG 2
site du barrage de Conqueyrac
FAILLE DE CORCONNE
pertes du Vidourle
Source de SAUVE
barrage de Ceyrac
VIDOURLE
limite topographique du bassin versant du Vidourle
PRIEUMASSEL
PLAINE DE POMPIGNAN
CAUSSE DE L'HORTUS
PLAN DE SITUATION GÉOLOGIQUE d'aprés la carte " région karstique nord - montpellieraine " 1 : 80 000 par Henri Paloc B.R.G.M
de l'Eocène du quaternaire
Calcaires marneux en plaquettes
marnes
Calcaires Karstiques - Causse de l'HORTUS
marnes
marno - calcaires Karstiques
calcaires Karstiques
marnes et calcaires marneux (plancher)
calcaire
marnes et schistes noirs
calcaire
CRÉTACÉ
JURASSIQUE
TRIAS
SOURCES KARSTIQUES
temporaires
pérennes
source impénétrable
grotte
aven
INDICES KARSTIQUES
aven , perte
aven sans circulation
grotte
circulation de surface temporaire
circulation de surface pérenne

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de CEYRAC* sur le RIEUMASSEL et le barrage de CONQUEYRAC* qui sera construit sur le VIDOURLE, sont destinés à écréter les crues particulièrement dévastatrices du VIDOURLE.

En raison du but qui leur est assigné, il n'était pas nécessaire que les cuvettes de ces ouvrages soient étanches. De ce fait, ces ouvrages ont pu être projetés et l'un d'eux construit dans des zones particulièrement karstiques sur des rivières non pérennes. Ils représentent donc en quelque sorte un cas limite.

Pour cette raison, le bilan des reconnaissances et le comportement lors des mises en eau présentent un intérêt exceptionnel.

Situés à quelques kilomètres l'un de l'autre, les deux sites s'inscrivent dans le même contexte géographique, géologique et surtout hydrogéologique ; il était donc logique de définir le cadre général dans un même chapitre.

- Situation générale :

La carte fig. 1 montre que les deux ouvrages sont situés à l'extrémité Est des CAUSSES nord-montpelliérains, dans le secteur qui alimente le réseau karstique de la source de SAUVE, l'un des cinq plus grands systèmes karstiques de la région.

● CARACTERES GENERAUX DU KARST NORD-MONTPELLIERAIN

Rappels géologiques

A l'Oligocène (-35 millions d'années), une phase d'évolution continentale qui a duré 5 à 7 millions d'années, a créé une vaste zone pénéplanée : c'est la surface Prémiocène.

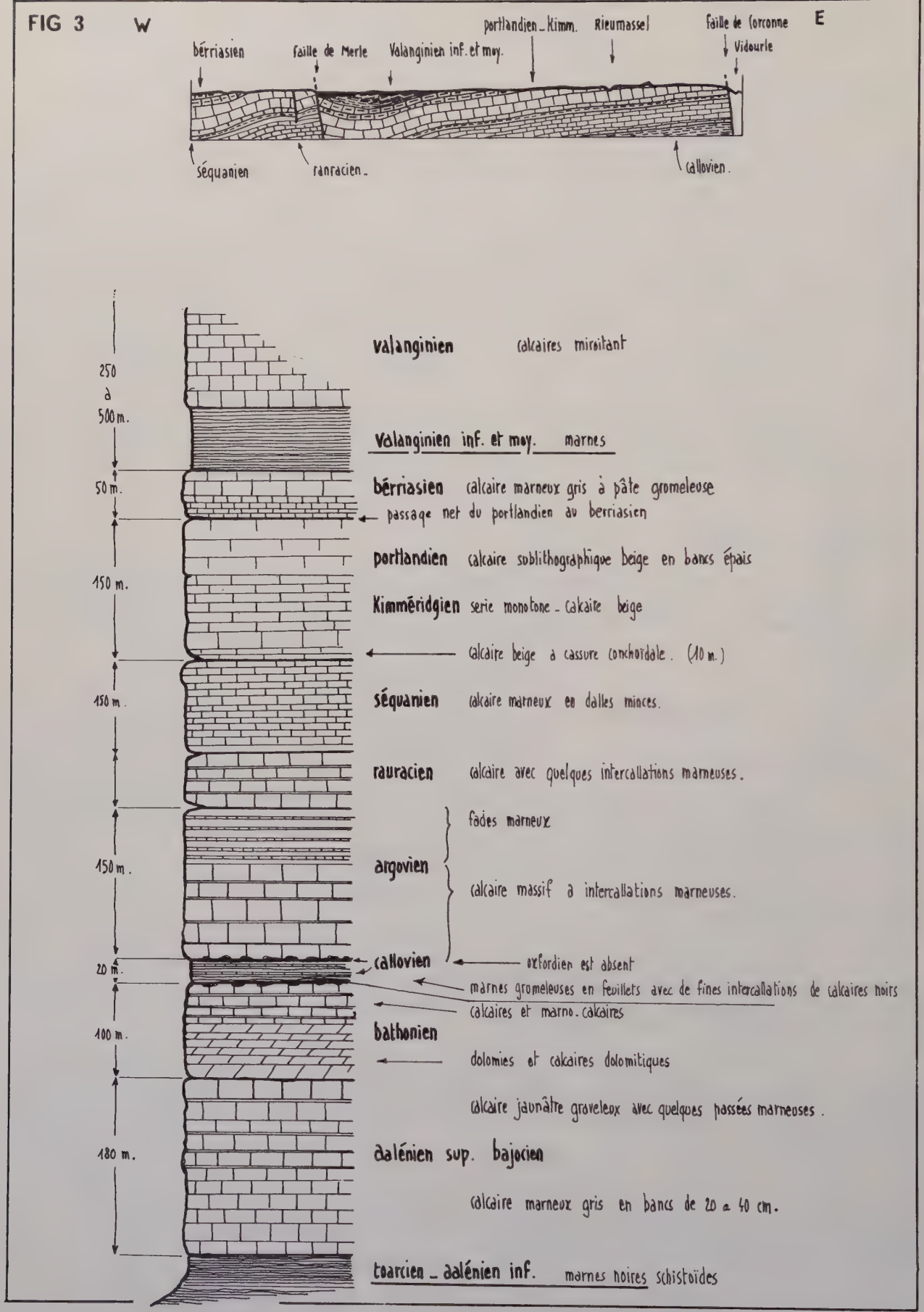
Au Miocène supérieur (-20 millions d'années), cette surface s'est légèrement déformée.

Au Villafranchien (Pliocène), la remontée de la zone cévenole s'est traduite par des déformations des surfaces morphologiques ; elle s'est accompagnée d'une reprise importante de l'érosion qui, creusant les zones les plus tendres, a mis en relief les unités calcaires.

Pour les géographes, les réseaux hydrographiques actuels peuvent en grande partie être considérés comme très voisins des réseaux oligocènes, bien que ces réseaux aient été déformés et aient dû s'adapter aux déformations pontiennes et pliocènes.

** Le Maître de l'ouvrage est le Département du Gard, le Maître d'oeuvre est la Direction Départementale de l'Equipement du Gard avec le concours du Bureau d'Ingénieurs Conseils COYNE & BELLIER.*

FIG 3


W
E
bérriasien
faille de Merle
Valanginien inf. et moy.
portlandien - Kimm.
Rieumassel
faille de Corconne
Vidourle
séquanien
rauracien
callovien
250 à 500 m.
50 m.
150 m.
150 m.
150 m.
20 m.
100 m.
180 m.
valanginien
calcaires miroitant
Valanginien inf. et moy. marnes
bérriasien calcaire marneux gris à pâte grumeleuse
passage net du portlandien au berriasien
portlandien calcaire sublithographique beige en bancs épais
Kimméridgien série monotone - calcaire beige
calcaire beige à cassure conchoïdale. (10 m.)
séquanien calcaire marneux en dalles minces.
rauracien calcaire avec quelques intercallations marneuses.
argovien
faciès marneux
calcaire massif à intercallations marneuses.
callovien
oxfordien est absent
marnes grumeleuses en feuillets avec de fines intercallations de calcaires noirs
calcaires et marno-calcaires
bathonien
dolomies et calcaires dolomitiques
calcaire jaunâtre graveleux avec quelques passées marneuses.
dalénien sup. bajocien
calcaire marneux gris en bancs de 20 à 40 cm.
toarcien - dalénien inf. marnes noires schistoïdes

Dans la zone des barrages de CEYRAC et de CONQUEYRAC, le CAUSSE de l'HORTUS (fig. 2) est un témoin de l'ancienne surface prémiocène ; le bassin de POMPIGNAN apparaît au contraire comme un des bassins creusés, durant la phase terminale, dans les formations les plus tendres.

Histoire de la karstification

La surface prémiocène paraît avoir joué le rôle de niveau de base par rapport à des cycles karstiques oligocène et miocène. L'importance de ces karstifications reste cependant encore controversée, en raison notamment de la difficulté de les identifier.

Au Pliocène, une karstification d'une certaine ampleur semble s'être développée ; de nombreux avens très concrétionnés sont considérés comme les témoins de cette phase. Le développement en profondeur de ces karsts pliocènes reste cependant également mal connu.

Après le Villafranchien, le rajeunissement du relief a favorisé une karstification intense. Ce rajeunissement a été à l'origine de l'enfoncement de l'HERAULT (et de la VIS) ; les autres affluents s'assèchent. Des écoulements souterrains se développent et creusent les réseaux karstiques.

Dans certaines zones à faible relief, chaque massif développe un système karstique indépendant dont le niveau de base est contrôlé soit par une formation étanche (c'est le cas du Causse de l'HORTUS), soit par un barrage naturel étanche (ce sont les karsts barrés) - c'est le cas de la source de SAUVE.

A l'époque pré-flandrienne, l'abaissement du niveau de la mer provoque un nouvel abaissement du niveau de base. Le VIDOURLE et le RIEUMASSEL perdent leurs écoulements de surface au profit des réseaux souterrains.

La remontée du niveau de la mer à l'époque flandrienne va provoquer l'ennoyage partiel de ces réseaux sans pour autant rétablir les circulations de surface.

Ces phases successives de karstification ont laissé partout de nombreux indices fossiles ou fonctionnels. Le tableau fig. 2 (première partie) met en évidence, mieux que toute description, l'ampleur de ces karstifications qui sont un des traits essentiels de la région calcaire nord-montpelliéraine.

2 - LE CADRE NATUREL (fig. 2)

Le bassin du VIDOURLE, en amont de la source de SAUVE, est une des vastes dépressions creusées tardivement par l'érosion dans les formations marno-calcaires du Crétacé inférieur. Au Sud, le Causse de l'HORTUS qui domine la plaine de POMPIGNAN, est une limite très nette. Au Nord et à l'Ouest, les reliefs qui limitent le bassin versant du VIDOURLE sont moins monolithiques, de nombreuses failles découpant les unités calcaires en unités de petite taille.

Plus que la géologie ou la morphologie, le caractère le plus marquant de cette zone est l'absence presque totale de circulations de surface (sauf en période de crues). Le drainage des eaux météoriques est en effet assuré par un grand système karstique qui débouche à la source de SAUVE ; cette dernière peut, dans une certaine mesure, être considérée comme la source du VIDOURLE.

2.1. GEOLOGIE

• Lithologie

La coupe fig. 3 présente la coupe stratigraphique et lithologique simplifiée des terrains intéressés par le bassin du VIDOURLE.

On note que la puissance totale des formations calcaires de l'Aalénien supérieur au Berriasien dépasse 500 m. Seuls, le Toarcien et le Valanginien inférieur ont une épaisseur suffisante pour jouer un rôle d'écran.

• Structure et tectonique

Les cartes fig. 2 et 4 et la coupe structurale fig. 3 illustrent les caractères principaux de la tectonique.

- Au Nord du VIDOURLE, un système complexe de failles amène à l'affleurement les formations étanches de l'Aalénien.

- Au Sud, la structure est plus simple : c'est une grande structure monoclinale, plongeant faiblement vers l'Ouest. En raison du pendage, les terrains les plus anciens affleurent à l'Est.

Les formations marno-calcaires du Crétacé qui sont encore bien représentées à l'Ouest et au Sud du bassin disparaissent dans les parties Est et Nord. Les calcaires berriasiens affleurent largement à l'Ouest : leur limite correspond à une limite morphologique. Les rivières, en atteignant les calcaires compacts du Jurassique, s'enfoncent rapidement et coulent dans des gorges dessinant des méandres.

La zone des retenues de CEYRAC et de CONQUEYRAC apparaît donc comme une structure monoclinale à pendage Ouest, limitée à l'Est par la faille de CORCONNE qui est à l'origine de la source de SAUVE. Au centre du bassin, la faille de MERLE (fig. 3) ramène localement à l'affleurement les calcaires du Portlandien.

2.2. LA KARSTIFICATION

L'importance de la karstification a déjà été signalée. La figure 2 montre le nombre et la localisation des principaux indices karstiques. On remarque le grand nombre d'avens ; certains permettent d'atteindre le karst noyé.

Dans le bassin du VIDOURLE, la proximité de la zone noyée est un des caractères majeurs du karst. La partie pénétrable et explorable du karst se réduit dans les parties basses du bassin à une tranche de quelques dizaines de mètres d'épaisseur et dans certains cas, à moins de 10 m.

2.3. L'HYDROGEOLOGIE

Les barrages sont au coeur même de la zone d'alimentation de la source de SAUVE. A l'amont de la source de SAUVE, le bassin versant topographique du VIDOURLE et de ses affluents est de 190 km2. Sur ces 190 km2, 110 km2 alimentent le réseau souterrain.

La source de SAUVE (débit maximum observé : 13 m3/s ; débit spécifique moyen du bassin versant: 16 l/s/km2) est alimentée à 65 % par les eaux du VIDOURLE amont qui disparaît à SAINT HIPPOLYTE-DU-FORT, à la cote 150. De toute évidence, il existe un drain souterrain qui ramène de SAINT HIPPOLYTE-DU-FORT à la source de SAUVE les eaux du VIDOURLE. Le transfert s'effectue en 20 jours (en période de sécheresse) pour une distance à vol d'oiseau de 8 km (coloration de 1942). Les 35 % restants correspondent à l'infiltration directe des eaux météoriques.

Les avens (aven du frère, de la soeur, grand aven) sont autant de regards sur la zone noyée. Les colorations ont permis de vérifier le sens des circulations.

La carte fig. 4 montre qu'à l'étiage, pour un plan d'eau à la cote 93,5 à la source de SAUVE, les regards sur la nappe indiquent 94,5 au grand aven, 94,7 à l'aven du frère et 100,5 sur le site de CONQUEYRAC (piézomètre), soit une pente hydraulique de 3 ‰, très caractéristique des systèmes karstiques évolués.

L'absence d'un piézomètre profond à CEYRAC est à regretter. On peut cependant considérer que, durant les périodes d'étiage, la nappe de fissures doit s'établir dans cette zone, aux alentours de la cote 110-115. Ceci explique que des forages de 20 m (le bed-rock est à 143,5), réalisés dans le cadre des études du barrage, n'aient pas atteint la zone noyée.

L'originalité hydrogéologique de cette zone est l'absence presque permanente d'écoulements de surface avec la présence d'une zone noyée relativement proche.

La comparaison entre les cotes de la nappe de fissures et les cotes du profil en long montre que les rivières seraient devenues pérennes si l'érosion avait approfondi leur lit de quelques mètres supplémentaires.

Les deux rivières, VIDOURLE et RIEUMASSEL, apparaissent donc très semblables ; même pente, même nature de roche du lit, même position par rapport à l'exurgence.

● Différences hydrogéologiques entre les sites de CEYRAC et de CONQUEYRAC

CONQUEYRAC est encore dans la zone où, en hautes eaux, l'engorgement du réseau provoque la remontée de la nappe jusqu'à la surface ; à CEYRAC, par contre, la nappe reste en profondeur, même en hautes eaux.

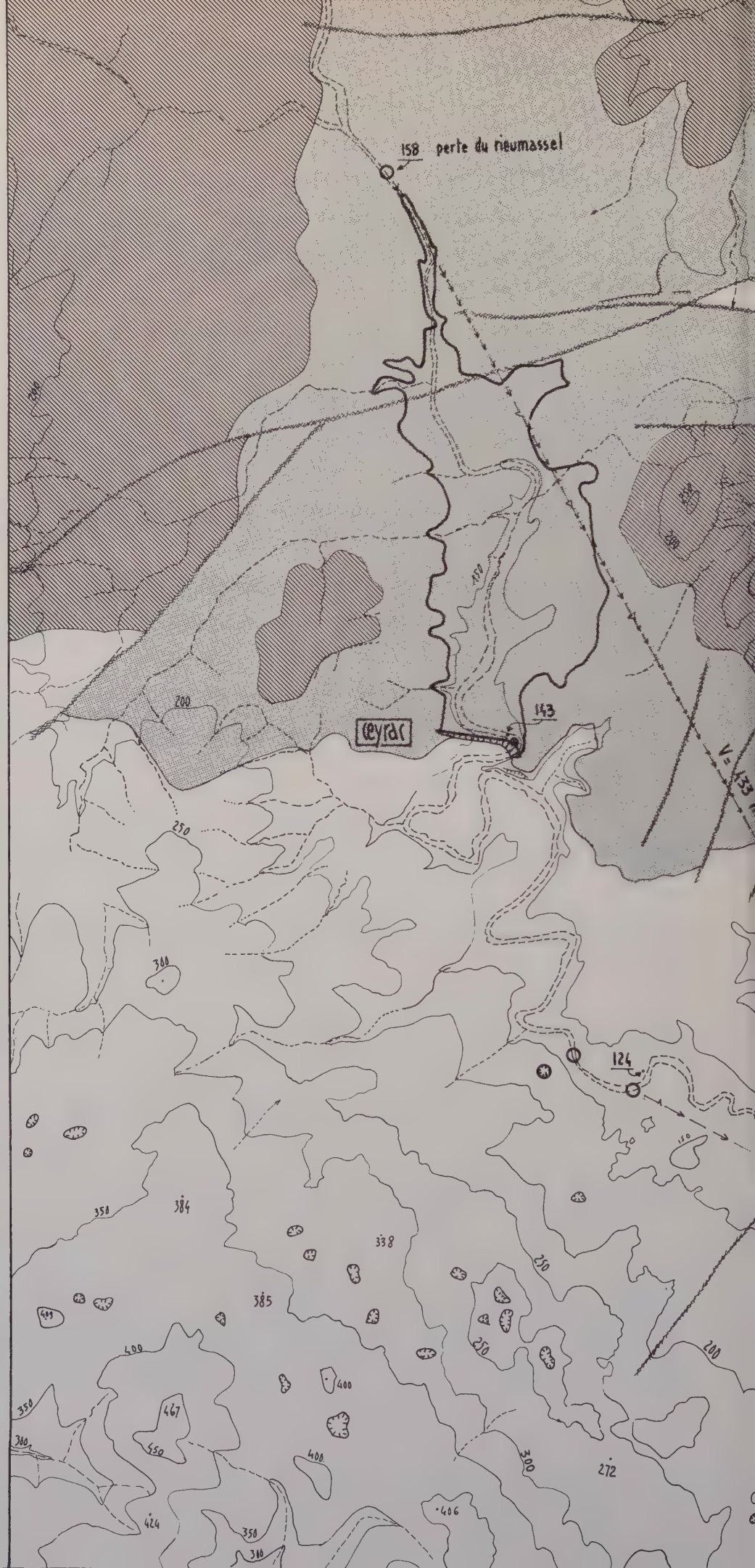
Cette différence est due à la position respective des sites le long des rivières. Tandis que le barrage de CEYRAC est situé à plus de 8 km du confluent VIDOURLE-RIEUMASSEL, le site envisagé pour le barrage de CONQUEYRAC est situé à seulement 2 km de ce même confluent. Le profil en long des rivières ayant une pente plus raide que les écoulements souterrains, il est donc normal que plus l'on remonte le cours de la rivière, plus la profondeur relative des écoulements souterrains par rapport au lit de la rivière augmente.

ceyrac - conqueyrac

FIG 4

carte hydrogéologique

1/25.000



- marnes - valanginien
- calcaires marneux - bérriasien
- calcaires - jurassique
- marnes - callovo - oxfordien

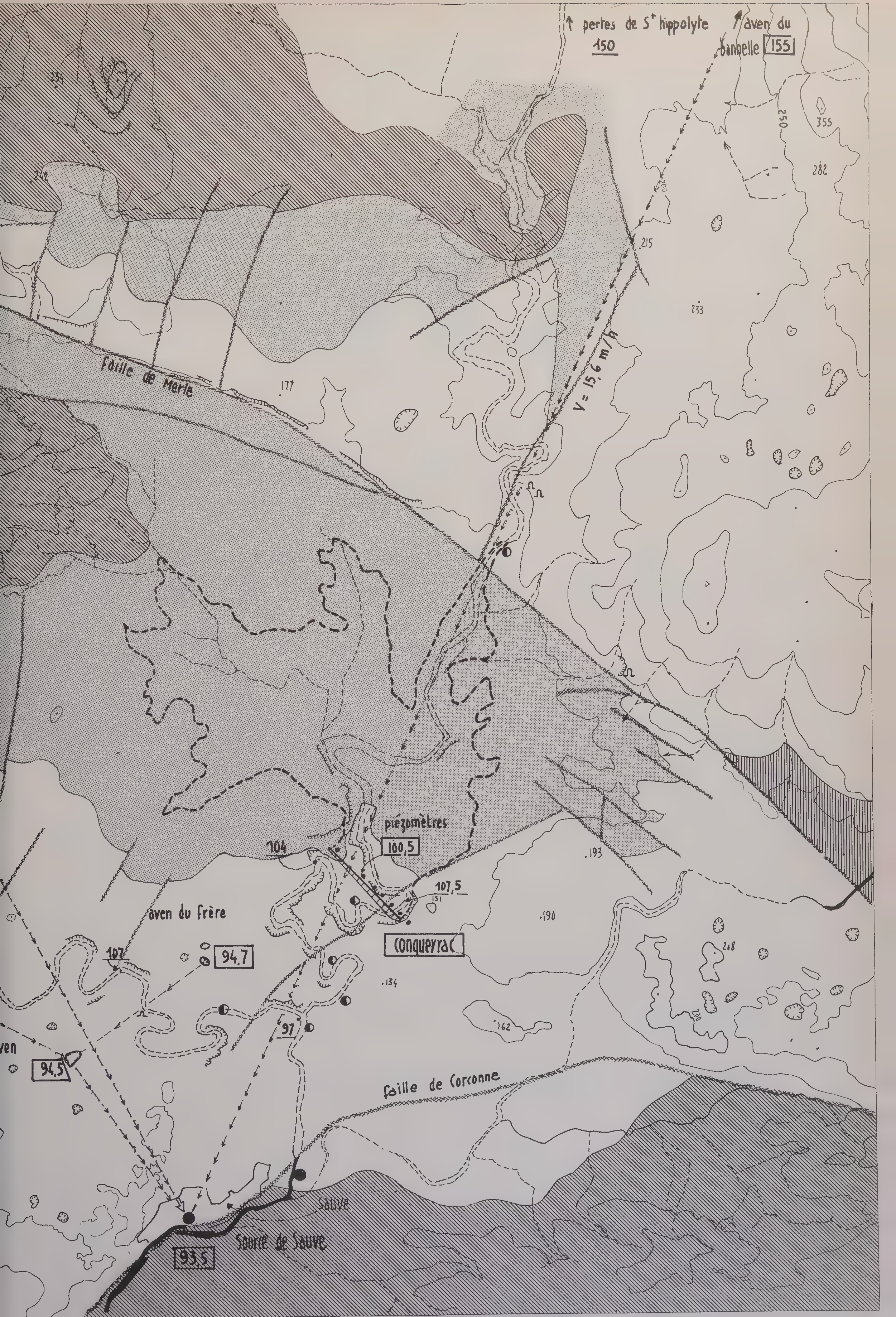
- faille
- falaise
- grotte
- doline ou aven

- rivière temporaire
- rivière pérenne
- 107 point coté dans le lit de la rivière
- perte en rivière (coloration)

- source pérenne
- source temporaire

V= 433 m/h relation mise en évidence par coloration. vitesse en ligne droite en mètres par heure

94,7 cote des niveaux d'eau souterrain dans les cavités karstiques et dans les piézomètres - (à l'étiage)..



pertes de St hippolyte
150
aven du banbelle
155
250
355
282
200
215
233
faille de Merle
177
V = 15,6 m/h
piézomètres
104
100,5
107,5
151
.193
.190
aven du Frère
107
94,7
conqueyrac
208
.134
200
.162
97
ven
94,5
faille de Corconne
Sauve
Source de Sauve
93,5

- Nature du drain souterrain :

Les faibles gradients, observés même en période de crues (1), les caractères du karst de la région, et les résultats des expériences menées dans le cadre des études de ces aménagements, conduisent à la conclusion suivante :

Il existerait d'une part quelques réseaux de grande taille bien individualisés et d'autre part une fissuration générale des grandes surfaces de calcaires exposés, assurant l'enfouissement des eaux météoriques.

Ces réseaux de grande taille qui transitent,en particulier les pertes des rivières (VIDOURLE et RIEUMASSEL), peuvent être assimilés à un VIDOURLE et à un RIEUMASSEL souterrains.

La capacité d'absorption des surfaces de calcaires exposés est très variable. La rapide concentration des fissures à partir de la surface signifie également que les grands conduits profonds sont creusés dans des zones peu perméables. La liaison avec le karst superficiel se fait par des conduits de transfert relativement peu nombreux.

Les régimes de crues peuvent donc présenter des décalages, la saturation de l'un des systèmes (profond ou superficiel) pouvant avoir lieu sans que le deuxième soit également saturé.

°
° °

(1) *La figure 1b montre les différentes valeurs de la piézométrie pour différents régimes. La très faible perte de charge entre le grand aven et la source implique un écoulement dans des réseaux très évolués, peut-être en partie dénoyés en période de basses eaux et vraisemblablement explorables en scaphandre autonome.*

A l'amont, la perte de charge paraît augmenter, mais il faudrait connaître le trajet réel des eaux pour juger de la nature des conduits.

CHAPITRE

15a

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Ceyrac

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Caractéristiques du projet
- Problème de l'étanchéité

2 - Le cadre naturel

3 - Traitements d'étanchéité - Mise en eau - Bilan

°
° °

RESUME

Le barrage poids de CEYRAC (hauteur 20 m., longueur en crête 390 m.) est construit sur le RIEUMASSEL, affluent rive droite du VIDOURLE.

L'ouvrage prend appui sur le sommet des calcaires du JURASSIQUE supérieur (PORTLANDIEN). A l'aval, la rivière coule dans une gorge sinueuse creusée dans les calcaires portlandiens. A l'amont, la retenue se développe dans les calcaires et les marno-calcaires du Crétacé inférieur. Toutes ces formations ont un pendage amont de 10° environ. La fracturation est d'intensité moyenne. En surface, quelques réseaux de diaclases sont visibles.

Plus de 40 avens et grottes sont connus dans les calcaires jurassiques à l'aval de l'ouvrage. Le lapiaz est localement bien développé. Les fouilles ont mis à jour de nombreux accidents bourrés d'argile rouge et, dans certains joints de stratification, des réseaux denses de conduits de faible taille.

A la hauteur de l'ouvrage, la nappe de fissures est située 30 m. au-dessous du lit de la rivière. Sauf en période de crue, les eaux du RIEUMASSEL disparaissent avant d'atteindre la retenue pour rejoindre la source de SAUVE. La vitesse des circulations souterraines est de 450 m/h. environ.

L'ouvrage étant destiné à écrêter les crues, un rideau d'étanchéité n'a pas été nécessaire. Les mises en eau temporaires ne se sont pas accompagnées de fuites notables.

SUMMARY

CEYRAC gravity dam (height 20 m, crest length 390 m) is built on the RIEUMASSEL, a right bank tributary to the VIDOURLE.

It is sited at the top of Upper JURASSIC (PORTLANDIAN) limestones. Downstream, the river flows through a meandering gorge cut through Portlandian limestones. Upstream of it, the reservoir covers Lower Cretaceous limestones and marly limestones. All these formations dip upstream at about 10°. Fracturation is of medium intensity. A few joint systems are visible at the surface.

More than 40 pot holes and caves are known to exist in the Jurassic limestones downstream of the dam. The grikes are numerous locally. The foundation excavations encountered many cracks completely filled with red clay and dense networks of small pipes in some bedding joints.

At the site of the dam itself, the fracture aquifer lies 30 m below the river. Flow in the RIEUMASSEL disappears before reaching the reservoir (except in times of flood) and re-emerges at SAUVE spring. The underground flow velocity is about 450 m/hour.

The purpose of the dam is flood absorption and no grout curtain was designed. No major leakage occurs when the lake is temporarily filled.

1 - GENERALITES

• CARACTERISTIQUES DU PROJET

Barrage en béton ; profil triangulaire ; volume : 25.000 m3
Hauteur maximum sur fondation : 20 m
Longueur en crête : 390 m
Capacité de débit : 85 m3/s par les pertuis
1000 m3/s par le déversoir
Cote de la crête : 156,40 m
Volume de la retenue : 7.000.000 m3
Largeur maximale : 800 m
Longueur amont-aval : 2,5 km
A l'amont du barrage, le bassin versant topographique est de 44 km2.

• PROBLEME DE L'ETANCHEITE

La finalité de l'ouvrage étant d'écrêter les crues, le problème de l'étanchéité de la retenue ne s'est pas posé.

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE

La cuvette occupe une zone relativement plate ; elle est creusée dans les séries marno-calcaires et argileuses du Berriasien (fig. 4).

L'ouvrage est situé sur le premier méandre (en partant de l'amont) qui marque l'entrée du RIEUMASSEL dans les calcaires du Portlandien. Avec une crête à 157,90, il est à peine plus bas que les reliefs environnants; les possibilités morphologiques (assez médiocres) du site ont été utilisées au maximum. Sa position par rapport au méandre est inhabituelle et explique la dissymétrie et les dimensions du barrage. L'appui rive gauche,situé dans le creux du méandre, est abrupt ; l'appui rive droite s'élève en pente douce sur l'arête rocheuse encadrée par la boucle de la rivière.

2.2. GEOLOGIE

L'ouvrage prend appui sur une série peu inclinée (10° vers l'amont), constituée par les calcaires du Portlandien surmontés par les calcaires lités du Berriasien.

Le contact entre les deux étages géologiques est situé à mi-hauteur de l'appui rive gauche.

Le Portlandien est un calcaire sub-lithographique, dur, cassant, stratifié en bancs puissants ; les joints sont le plus souvent stylolithiques et généralement peu visibles.

Le Berriasien, stratifié en bancs de quelques décimètres, est un calcaire légèrement marneux, grumeleux ou noduleux à pâte fine, contenant des inclusions pyriteuses. Il est très fossilifère.

● La fracturation

Le site du barrage est dans une unité peu tectonisée. On trouve cependant quelques failles soulignées par de la calcite ou des brèches. En surface, on distingue plusieurs réseaux de diaclases :

1) Direction : 180°-165°, pendage vertical ;
2) Direction : 118°, pendage vertical.

Ces réseaux sont francs, généralement sans remplissage. Bien marqués en surface, ils deviennent rapidement potentiels en profondeur.

Le lapiaz s'ordonne autour de ces réseaux.

2.3. LA KARSTIFICATION LOCALE

Plus de 40 avens et grottes ont été répertoriés à proximité de l'ouvrage, en particulier à l'aval dans les formations jurassiques.

Sur le site, un joint karstifié souligne le passage des calcaires massifs du Portlandien aux calcaires lités du Berriasien (1). Ce type de karstification est à rapprocher, selon certains géologues, des karsts cutanés formés durant les périodes glaciaires.

Sur les rives, les surfaces dénudées révèlent un lapiaz moyennement évolué.

Ce sont les travaux au rocher, en particulier les fouilles, qui ont le mieux mis en évidence les caractéristiques de la karstification sur les premiers mètres.

Dans toute l'emprise des fouilles, le terrain s'est révélé découpé par un réseau de cassures (D : 160°) espacées de 2 à 5 m (2).

(1) *Plus exactement, il a été conventionnellement choisi comme limite Portlandien-Berriasien.*

(2) *Par exemple, 18 cassures dont 8 karstifiées sur 0,5 à 1 m de large, ont été mises à jour sur 60 mètres linéaires de fouilles.*

En plus de ce réseau, le rocher est également parcouru par de petites failles d'orientations diverses.

Les accidents verticaux, larges dans certains cas de plus de 50 cm, étaient systématiquement bourrés par une argile rouge compacte. Une seule faille ouverte, pénétrable sur 15 m, a été mise à jour dans le plot 11.

En plus de ces accidents verticaux karstifiés, les reconnaissances ont montré que certains joints stratigraphiques étaient parcourus par un réseau dense de conduits anastomosés, constituant un véritable réseau de drainage de l'interstrate (karst de joint).

2.4. HYDROGEOLOGIE

- Rappel (voir chapitre 14)

Le barrage de CEYRAC est situé à 4,250 km (à vol d'oiseau) de la source de SAUVE. En prenant pour les écoulements souterrains une pente de 5 ‰, la cote théorique de la nappe serait de 114,5 environ.

A la hauteur de l'ouvrage, le lit de la rivière se situe à la cote 143,5, soit 30 m au-dessus du niveau de la zone noyée. Rappelons que, sauf en période de crues, les eaux du RIEUMASSEL disparaissent à l'amont de la retenue pour rejoindre la source de SAUVE.

Dans l'emprise de la retenue, même en hautes eaux, aucune arrivée d'eau par les versants n'a été observée (1). La vitesse des circulations souterraines (433 m/h pour 6,80 km) montre l'efficacité du drainage souterrain ; pour cette raison, on peut envisager l'existence d'un important réseau souterrain parallèle au RIEUMASSEL.

Dans l'emprise de la cuvette, creusée dans les marno-calcaires du Berriasien, les relations entre les écoulements de surface et les drains profonds paraissent difficiles. C'est en effet dans les traversées du Jurassique (en amont de la faille de MERLE et à l'aval du barrage) que se situent les pertes.

En conclusion, la cuvette du barrage de CEYRAC apparaît comme creusée dans un matériau relativement étanche mais qui reste suspect - le Berriasien -. Cette formation repose sur un substratum karstique drainé par d'importants conduits, situés à 50 ou 100 m sous le fond de la cuvette.

3 - TRAITEMENTS D'ETANCHEITE - MISE EN EAU - BILAN

● Les principales fissures du fond de fouille ont fait l'objet d'un traitement particulier. Le souci du projeteur était d'éviter que des venues d'eau

(1) *Pendant les crues, le RIEUMASSEL coule ; durant ces périodes, si des arrivées d'eau se produisent dans le lit de la rivière, elles sont difficiles à mettre en évidence.*

importantes arrivant par ces fissures, ne créent au contact béton-rocher des sous-pressions inadmissibles. Pour éviter ce risque, les principales fissures ont été laissées visibles (drains pénétrables interconnectés) et ont été prolongées par des ouvrages d'évacuation largement dimensionnés.

Ce dispositif complète un voile de drainage (forages au supermarteau en Ø 60 mm, réalisés à partir de la galerie de pied).

Enfin, le parafouille amont a été complété par un voile d'injection descendu 5 m au-dessous des fouilles.

● La mise en eau a eu lieu au printemps 1968. Aucune communication n'a été observée entre la retenue et les chenaux karstiques de la fondation. Aucune résurgence n'a été signalée à l'aval. Un certain colmatage de la retenue a même été constaté.

Il est cependant difficile de démontrer l'absence de fuite pour la retenue de CEYRAC.

● En effet, compte tenu des caractères hydrogéologiques de la zone, on doit considérer que toute infiltration (exception faite des courcircuitages immédiats du barrage) doit ressortir à la source de SAUVE.

Pour être décelables, ces fuites doivent être supérieures à un certain pourcentage du débit naturel de cette source. Mais, une telle mesure est délicate car les remplissages et les crues à la source sont les conséquences d'un même phénomène. On est ainsi conduit à envisager que seule une coloration des eaux de la retenue pourrait mettre en évidence les éventuelles pertes de la retenue.

Enfin, en raison de la présence des réseaux karstiques, situés de 50 à 70 m sous le fond de la cuvette, même si la retenue est actuellement étanche, un débourrage brutal suivi de fuites de plusieurs m3/s reste possible.

°
° °

CHAPITRE

15b

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Conqueyrac

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage

2 - Le cadre naturel

3 - Impressions générales - Commentaires

°
° °

RESUME

Le barrage (projet) de CONQUEYRAC (hauteur 17 m., longueur en crête 570 m.) sera édifié sur le VIDOURLE.

Il prendra appui sur les calcaires karstiques du Portlandien (Jurassique supérieur). A l'aval, la rivière coule dans une gorge très sinueuse creusée dans le Portlandien. A l'amont immédiat de l'ouvrage, la retenue se développe sur les derniers affleurements de calcaires jurassiques puis sur les calcaires et les marno-calcaires du crétacé inférieur. Le pendage des couches est de 10° vers l'amont. Sur le site, les calcaires sont découpés par de nombreuses diaclases; une faille importante traverse le site d'une rive à l'autre.

Le lapiaz est très développé en surface; de nombreux avens sont connus à l'aval du site dans les calcaires jurassiques.

Durant les périodes de sécheresse, les eaux du VIDOURLE se perdent en queue de retenue pour rejoindre la source de SAUVE par les réseaux karstiques. Le niveau des écoulements souterrains se situe quelques mètres au-dessous du niveau du bed-rock. En période de pluie, le niveau remonte jusqu'à la surface.

SUMMARY

The designed CONQUEYRAC dam (height 17 m, crest length 570 m) will be built on the VIDOURLE.

It will sit on Portlandian (Upper Jurassic) karstic limestones. Downstream, the river flows through a very meandering gorge through the Portlandian formations. Immediately upstream of the dam, the lake will cover the last outcrops of Jurassic limestones and then Lower Cretaceous limestones and marly limestones. The beds dip 10° upstream. The limestones at the site contain many fractures and a major fault crosses the site from bank to bank.

The grikes are numerous at the surface. There are many pot holes in the Jurassic limestones downstream of the site.

In dry weather, the VIDOURLE loses all his water at the upper part of the reservoir into karst networks; the flow re-emerges at SAUVE spring. The underground water flows a few metres below bed rock surface. In times of rain, the level rises up to the ground surface.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Etudié, mais non encore réalisé, le projet de barrage de CONQUEYRAC a fait l'objet d'études poussées, en particulier dans le domaine de l'hydrologie ; les résultats de ces études méritent d'être connus.

● CARACTERISTIQUES DU PROJET

Barrage en enrochements avec voile amont et tirants en béton armé
Hauteur : 17 m
Longueur en crête : 560 m
Capacité de la retenue : ?
Dimensions maximales de la retenue : amont-aval : 2 km
largeur : 2,5 km

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE (fig. 4)

Le site choisi pour l'ouvrage est situé sur l'important méandre du VIDOURLE qui souligne le contact du Berriasien et du Jurassique.

A l'amont du site, la rivière coule dans un paysage relativement plat, creusé dans les marno-calcaires du Berriasien. A l'aval, la rivière a creusé un petit canyon en méandres dans les calcaires durs du Portlandien.

La retenue se développe en majeure partie sur les marno-calcaires du Berriasien ; cependant, à proximité de l'ouvrage et en queue de retenue (par le jeu de la faille de MERLE), elle atteint les calcaires du Portlandien.

Malgré la faible hauteur de l'ouvrage, la retenue s'étale largement en raison de la topographie très douce.

La largeur de l'ouvrage, 560 m (pour 17 m de haut), ainsi que la forme de la retenue, montrent que les possibilités topographiques sont utilisées au maximum. L'ouvrage sort largement du canyon dont la profondeur ne dépasse pas 10 m à la hauteur du site.

2.2. GEOLOGIE

L'ouvrage prendra appui sur les calcaires massifs du Portlandien ; en rive gauche, l'extrémité de l'ouvrage atteindra les premiers bancs du Berriasien.

Le Portlandien est constitué par des bancs massifs mal individualisés, de calcaire sub-lithographique de couleur beige. Le Berriasien, plus marneux, se présente en bancs bien stratifiés d'épaisseur moyenne.

Le pendage moyen des couches ne dépasse pas 10° vers l'amont. La résistance mécanique de ces formations est bonne.

A la hauteur de l'ouvrage, l'épaisseur des alluvions dans la rivière et celle des terrains de couverture sur les rives, sont pratiquement nulles, hormis quelques petites terrasses isolées situées dans les méandres.

- La fracturation

Une faille importante (F), fig. 4, traverse d'amont en aval le site. Cette faille joue vraisemblablement un rôle de drain. Sur le site, elle est soulignée par une zone particulièrement lapiazée et par des broyages et des macrocristallisations de calcite.

La masse rocheuse des appuis (Jurassique) est découpée par plusieurs systèmes de diaclases.

Dans le lit de la rivière, sur le site, deux systèmes orthogonaux de diaclases verticales, orientées à 45° par rapport à l'axe de la rivière, fractionnent régulièrement le massif rocheux. Dans les tranchées de reconnaissance, des réseaux denses de diaclases (espacement 0,5 m, pendage 65°) sont bien visibles. Ces réseaux sont soulignés par la karstification sur quelques mètres de profondeur.

2.3. LA KARSTIFICATION

A proximité du site, sur le plateau, de part et d'autre de la rivière, le lapiaz est localement très évolué. Par endroits, la marche même est difficile ; certaines fissures karstiques sont pénétrables sur plusieurs mètres.

Les tranchées de reconnaissance fournissent des coupes de plusieurs mètres de profondeur dans la zone lapiazée. D'une façon générale, les fissures élargies par la karstification sont bourrées par des argiles rouges très denses et compactes.

Ce bourrage, très complet, assure, du moins localement, une bonne étanchéité comme le montre le fait suivant : en période de crues, alors que le niveau du VIDOURLE est plus haut que le fond de la tranchée située à 20 m de distance, cette dernière n'est pas envahie par les eaux.

2.4. HYDROGEOLOGIE

Les eaux du VIDOURLE qui disparaissent à SAINT HIPPOLYTE-DU-FORT, 6 km à l'amont du site du barrage, sont ramenées à la source de SAUVE située à 2,5 km à l'aval, par des écoulements souterrains.

La liaison a été vérifiée par coloration. La vitesse de propagation de l'onde colorée a été de 15,6 m/h (en ligne droite)(fig. 4).

Cette vitesse apparaît comme extrêmement faible et assez surprenante par rapport à la vitesse obtenue à partir des pertes du RIEUMASSEL : 433 m/h soit un rapport de 1 à 27. Ces deux systèmes karstiques se développent en effet dans le même contexte géologique.

Si l'on admet que les écoulements se font en grande partie en conduit noyé (c'est-à-dire avec des vitesses sensiblement proportionnelles aux débits), le tableau ci-dessous montre que le rapport des vitesses n'est plus que de 1 à 2.

coloration	débit à la perte l/s	distance m	débit à la résurgence l/s	vitesse
perte du VIDOURLE (aven de BONNELLE)	25	7500	150	15,6 m/h
perte du RIEUMASSEL	50	6500	2000	433 m/h

Rapport des vitesses : $\frac{433}{15,6} = 27$

Rapport des débits : $\frac{2000}{150} = 13$

Il faut également signaler que l'injection du colorant a été faite, pour la coloration du VIDOURLE, à partir d'un aven qui n'est peut-être pas sur l'écoulement principal ; il peut donc y avoir une progression lente au départ. En tenant compte des conditions hydrogéologiques existant à l'époque de l'essai, on doit considérer que les faibles vitesses obtenues n'interdisent pas d'envisager l'existence d'un drain bien évolué de grande section, ramenant à SAUVE les eaux du bassin versant amont du VIDOURLE. Seule une coloration en période de crues permettrait de préciser cette question.

Dans les méandres à l'aval du site, un certain nombre de sources temporaires ont été inventoriées. Ces sources correspondent soit à un court-circuitage des méandres par les eaux du VIDOURLE (c'est le cas pour le méandre du barrage), soit à des apports de versants, en périodes humides. Durant ces périodes, l'engorgement de la nappe ne permet plus aux eaux de rejoindre le drain profond.

Sur le site du barrage, les piézomètres, fig. 1c, montrent qu'en période d'étiage, la zone noyée est située 7 m sous le lit de la rivière. En période de pluies, l'engorgement provoque la remontée de la nappe jusqu'à la surface.

L'analyse du régime des eaux indique d'autre part qu'il existe un certain isolement entre le réseau profond et le réseau cutané. En période de pluies, il peut en effet y avoir une crue cutanée rapide puis, avec un certain décalage, une crue profonde.

3 - IMPRESSIONS GENERALES - COMMENTAIRES

Le caractère le plus original du projet est que l'on est en présence d'un réseau karstique qui fonctionne à quelques mètres à peine au-dessous du niveau du lit de la rivière. La morphologie karstique et l'hydrogéologie suggèrent que des cavités de grande taille et des réseaux actuellement fonctionnels se développent sous la cuvette.

Comme à CEYRAC, l'étanchéité de la retenue va dépendre de la qualité de l'écran constitué par les marno-calcaires du Berriasien, là où ils sont présents.

En raison de la topographie, les réseaux karstiques sont, sans doute, beaucoup plus proches du fond de la cuvette que sur le site de CEYRAC; le risque de débourrage est donc plus grand.

L'absence du Berriasien à proximité de l'ouvrage et en queue de retenue, augmente également les risques d'infiltrations. Sauf à proximité de l'ouvrage, où un court-circuitage direct des appuis peut être envisagé, les fuites éventuelles devraient, comme à CEYRAC, alimenter la source de SAUVE.

°
° °

CHAPITRE

16

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Quinson

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Problème de l'étanchéité de la retenue
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel

3 - Traitements - Mise en eau - Bilan

°
° °

Figure 1 : Carte géologique du site, 1 : 20 000

Figure 2 : Coupe structurale, 1 : 10 000

Figure 3 : Coupes lithologiques

Figure 4 : Hypothèse et périmètres de fuites, 1 : 20 000

Dessin 1 : Vue générale du site depuis l'aval, d'après une vue aérienne

Photo 2 : La retenue et le barrage actuel vus depuis l'amont

°
° °

Bibliographie :

- Rapports et archives de la Division Géologie Géotechnique - Electricité de France - Inédits.
- LUMLEY (H. de) (1965) : Le paléolithique inférieur et moyen dans son cadre géologique - C.N.R.S. Gallia préhistoire - tomes 1 et 2.

RESUME

Le barrage voûte de QUINSON (hauteur 54,5 m.) sera édifié sur le VERDON, affluent rive gauche de la DURANCE - Alpes du Sud - FRANCE. Il remplacera un barrage de 15 m. de hauteur construit il y a un siècle.

L'ouvrage sera construit à la sortie aval d'une gorge de plusieurs km. de longueur creusée par le VERDON dans les calcaires karstiques du jurassique supérieur. A l'aval du site, cette gorge débouche dans la plaine de QUINSON, qui est un fossé d'effondrement; le rejet de la faille qui limite le fossé à l'amont, dépasse 250 m. Elle amène au contact des calcaires jurassiques, des marnes rouges d'âge tertiaire qui constituent un écran étanche à l'aval. Les calcaires jurassiques sont stratifiés en bancs d'épaisseur moyenne, séparés par des intercalations de marnes vertes. Ils présentent un faible pendage aval. De grandes cassures, parallèles à la gorge, découpent le massif calcaire. Ces accidents qui se développent sur plusieurs centaines de mètres, constituent un des caractères marquant du site.

La karstification régionale est en partie ancienne et fossile. 25 cavités karstiques situées pour la plupart en rive droite, à l'amont du site, ont été explorées. La karstification a également élargi les grandes cassures verticales amont-aval; dans leur grande majorité, les cavités sont colmatées à 95 %. Sur les deux rives, la surface du plateau calcaire est recouverte en grande partie par des dépôts marneux étanches qui freinent la pénétration de l'eau.

Le VERDON constitue le niveau de restitution des écoulements souterrains. Très en amont, dans la retenue, quelques sources karstiques à faible débit sont connues.

Malgré l'absence d'un voile d'injection, la mise en eau du barrage actuel n'avait été accompagnée d'aucune fuite au rocher.

SUMMARY

QUINSON arch dam will be 54.5metres high on the VERDON, a left bank tributary to the DURANCE in the southern French Alps. It will replace a 15 metres high dam built a century ago.

It will be sited at the exit from a gorge several kilometres long cut by the VERDON through Upper Jurassic karstic limestones. Downstream, the gorge enters the QUINSON plain, which is a graben structure; the throw of the upstream boundary fault is more than 250 m. It brings the Jurassic limestones into contact with Tertiary red marls which form a downstream impervious barrier. The Jurassic limestones lie in beds of moderate thickness with interbedded green marls. They dip slightly downstream. Large fractures parallel to the gorge cut through the limestone rock mass. These continue for several hundreds of metres and are one of the site's main characteristics.

On the regional scale, karstification is old and fossile. Twenty-five karstic cavities, mostly on the right bank upstream of the site, have been explored. Karstification processes have also widened the large vertical fractures running upstream-downstream. Most of the cavities are 95 % blocked. A large part of the surface of the limestone plateau lies under impervious marl deposits that slow down infiltration.

The VERDON lies at the level at which underground flow re-emerges. There are a few karst springs with low discharges in the reservoir a long way upstream.

Despite the fact that there is no grout curtain, there was no leakage through the rock when the present dam was impounded.

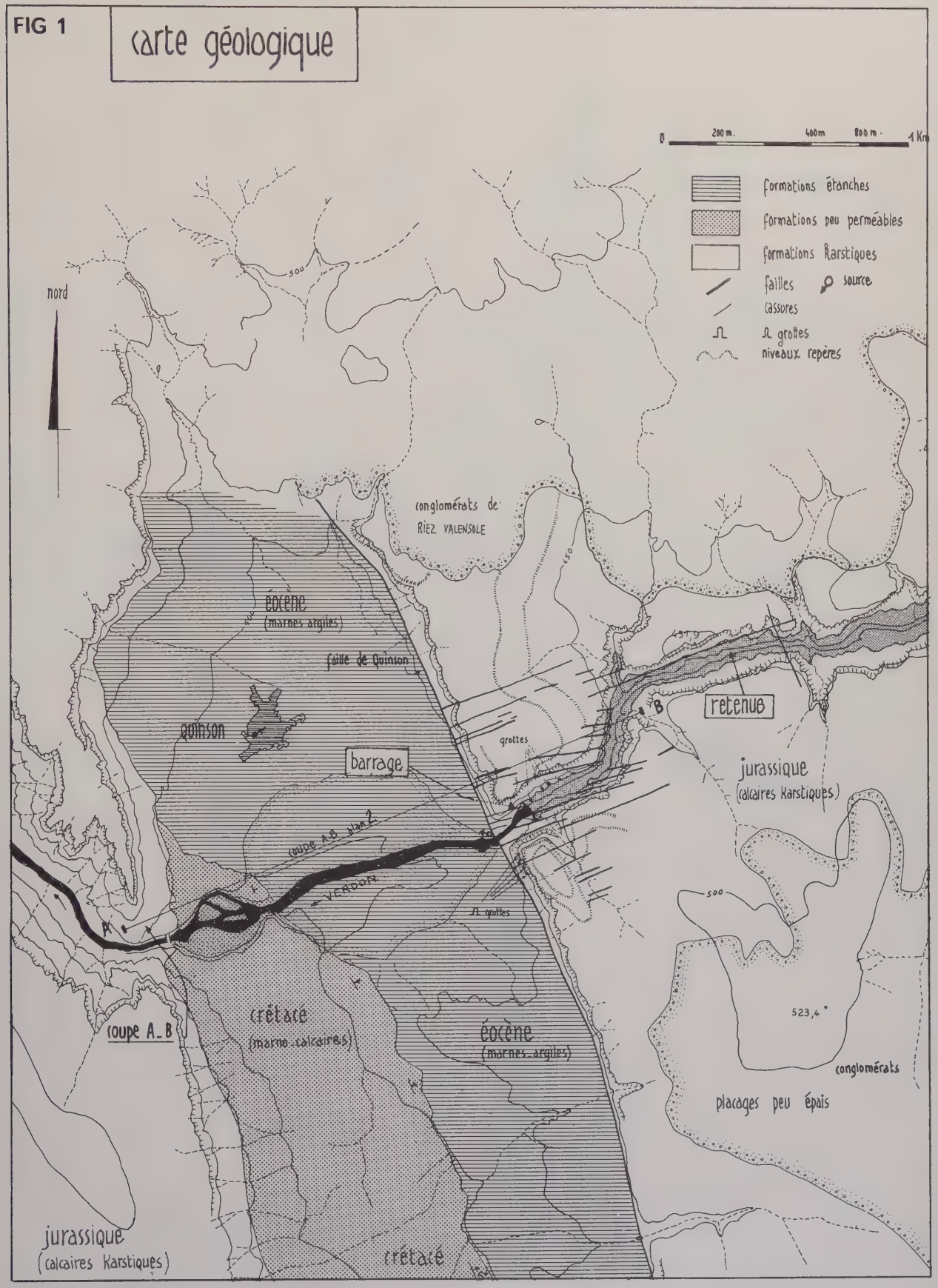


FIG 1
carte géologique
0 200 m. 400m 800 m. 1 Km
formations étanches
formations peu perméables
formations Karstiques
failles
source
cassures
grottes
niveaux repères
nord
conglomérats de RIEZ VALENSOLE
éocène (marnes argiles)
faille de Quinson
quinson
barrage
grottes
retenue
jurassique (calcaires Karstiques)
coupe A-B plan
VERDON
coupe A_B
crétacé (marno calcaires)
éocène (marnes argiles)
523,4
conglomérats
placages peu épais
jurassique (calcaires Karstiques)
crétacé

SITE DE QUINSON VUE GÉNÉRALE DEPUIS L'AVAL

dessin **1**

1 : Faille de Quinson

2 : Emplacement du barrage actuel (masqué)

3 : Le canal d'amenée à partir du barrage actuel

4 : Point de sortie de la dérivation provisoire

5 : Les grandes cassures amont aval

6 : Niveau à grotte rive gauche

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le site du barrage de QUINSON est actuellement occupé par un petit barrage de 15 m de haut dont la crête atteint la cote 374. Il a été construit il y a un siècle environ.

Le barrage actuellement en construction atteindra en crête la cote 404,50 ; il se situera quelques mètres à l'aval du barrage actuel qui sert de batardeau amont Vis-à-vis du problème de l'étanchéité de la cuvette, le projet en cours peut être considéré comme une surélévation du barrage existant.

Le barrage actuel présente l'originalité d'avoir été construit sur les alluvions et de n'avoir bénéficié d'aucun traitement d'injection du rocher.

● PROBLEME DE L'ETANCHEITE DE LA RETENUE

La retenue se développe en totalité dans des calcaires karstiques (fig. 1). Le barrage est fondé sur les mêmes calcaires. Les premières formations étanches sont situées plusieurs centaines de mètres au-dessous du fond de la cuvette et ne jouent aucun rôle dans l'étanchéité.

A l'aval du barrage, les marnes étanches du fossé de QUINSON limitent les zones de résurgences possibles (fig. 2).

L'étanchéité de la retenue dépend essentiellement de l'importance et de la continuité de la fissuration et de la karstification.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE PROJETES

Barrage voûte
Hauteur maximale : 54,50 m
Volume : 30.000 m3
Cote en crête : 404,50

Retenue :
Longueur aval-amont : 15 km
Largeur : 100 m en moyenne
Volume : 18,6 Mm3
Remarque : Le niveau du plan d'eau subira des variations importantes et rapides.

LA KARSTIFICATION REGIONALE (1)

Dans toute la région, les écoulements de surface sont exceptionnels. Les vallées affluentes du VERDON sont des vallées suspendues. Les seuls apports non négligeables qui atteignent le VERDON proviennent des affluents dont le bassin versant est constitué, en totalité ou en partie, par les marnes du plateau de RIEZ VALENSOLE. Mais, par la nature de leur sol, ces bassins marneux ont des débits spécifiques médiocres qui ne contribuent que faiblement à l'alimentation du VERDON.

L'histoire karstique de la région est longue, ancienne et complexe.

Avant le Miocène, la région a été soumise à une importante phase de karstification.

A partir du Miocène, les dépôts marneux et conglomératiques de RIEZ VALENSOLE recouvrent d'un tapis d'épaisseur variable le plateau calcaire, colmatant et fossilisant en partie le karst anté-miocène.

L'extension de ce tapis est inégale ; le VERDON, à la hauteur de QUINSON, se situe à la limite Sud de la zone d'extension de ces dépôts (2). Ce tapis marneux bien développé en rive droite, se réduit souvent en rive gauche à des placages de faible épaisseur. Dans cette zone méridionale, au Sud du VERDON, le karst, incomplètement fossilisé et mal protégé, a poursuivi son évolution depuis le tertiaire jusqu'à nos jours.

C'est seulement au quaternaire que le VERDON creuse son lit actuel. Les réseaux karstiques anciens sont en partie décolmatés et participent à nouveau au drainage des masses calcaires ; un karst quaternaire se développe également à côté du karst ancien (3).

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE

La retenue (photo 2) occupera un étroit canyon de 15 km de long, creusé par l'érosion fluviatile ; sa profondeur est de 100 m environ, sa largeur dépasse rarement 50 m.

(1) *Voir également "La retenue de GREOUX" et "La retenue de SAINTE CROIX", chapitres 12 et 17.*

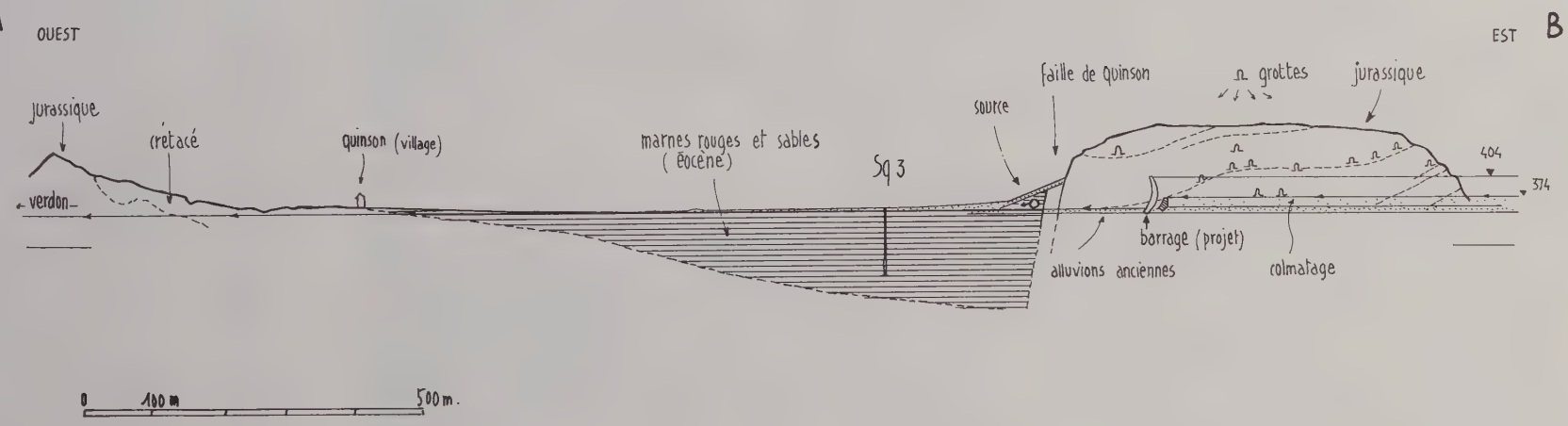
(2) *On peut avancer l'hypothèse que le VERDON a d'abord localisé son cours à la limite des marnes et du plateau calcaire pour ensuite s'enfoncer sur place dans le plateau calcaire.*

(3) *La grotte de la BONNE BAUME par exemple est considérée par les préhistoriens comme une cavité d'âge quaternaire. Cette cavité a fait l'objet de recherches très poussées.*

Photo R. THEROND

Photo 2
LE SITE DE QUINSON VU DEPUIS L'AMONT

1 : Le barrage actuel
2 : Niveau de la crête du futur barrage
3 : Les grandes fissures amont-aval
4 : La Bonne Baume (niveau karstique)
On distingue (comparer avec la coupe structurale figure 2) le plongement en saut de ski des couches entre la Bonne Baume et le site du barrage.



coupe géologique A_B implantation voir fig 1

FIG 2

Ce canyon se développe vers l'amont jusqu'à la plaine des SALLES (1) ; il présente quelques élargissements locaux (plaine de SAINT LAURENT, plaine de MONTPEZAT).

2.2. GEOLOGIE

• Stratigraphie, lithologie, pétrographie

Le canyon est creusé dans la partie sommitale des calcaires du Jurassique supérieur. La figure 3 donne une image de la puissance des couches à proximité du site du barrage. Les séquences repères, définies au voisinage de l'ouvrage, peuvent être suivies sur plusieurs kilomètres.

Les bancs calcaires sont séparés par des intercalations de marnes verdâtres de quelques centimètres d'épaisseur. Ces formations à marnes vertes (illites en général), sont caractéristiques du Jurassique supérieur.

Le calcaire est pur, cassant, de couleur beige clair ; la pâte est très finement cristallisée. Il ne présente jamais l'altération bicolore caractéristique des calcaires crétacés.

• Structure

La coupe, fig. 2, met en évidence la structure du fossé de QUINSON qui limite vers l'aval le canyon. Le fossé de QUINSON est un cas exemplaire de fossé d'effondrement ; il est limité à l'Ouest par un accident souple et à l'Est par un accident très net à rejet vertical, la faille de QUINSON (2).

A l'amont immédiat du fossé, l'unité calcaire présente encore des déformations souples qui annoncent la proximité de la faille de QUINSON. A la hauteur du barrage, ces couches se déforment en "saut de ski" (fig. 2). Plus à l'amont, jusqu'à la plaine des SALLES, la structure est dans l'ensemble tabulaire avec,localement,des accidents (SAINT LAURENT, MONTPEZAT).

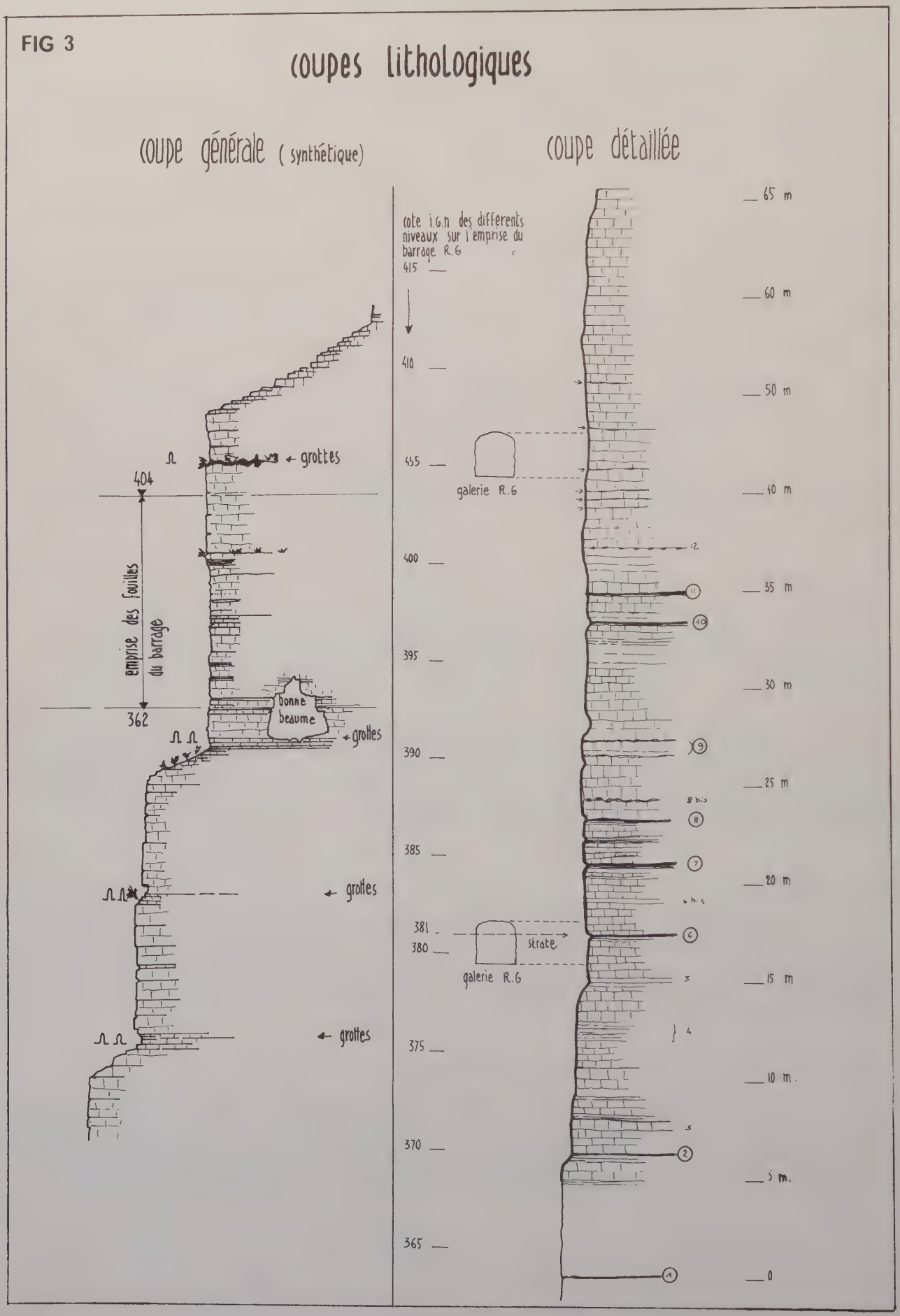
• Fracturation

Un système de fractures extrêmement net se développe perpendiculairement à la faille de QUINSON (dessin 1 et fig. 1). Ces fractures sont associées à des déformations à grand rayon de courbure. Dans le détail, chaque fracture apparaît comme une petite zone faillée pouvant atteindre 1 m de largeur ; le rejet dépasse rarement quelques décimètres.

(1) *Voir chapitre 17 "La retenue du barrage de SAINTE CROIX".*

(2) *La faille de QUINSON a été recoupée par les travaux au rocher, exécutés dans le cadre de cet aménagement . La zone tectonisée comprend une mylonite calcaire de 2 à 3 m d'épaisseur et une zone broyée d'une dizaine de mètres au maximum dans les marnes éocènes. Les stries de friction sont verticales.*

FIG 3


coupes lithologiques
coupe générale (synthétique)
coupe détaillée
grottes
404
emprise des fouilles du barrage
362
bonne beaume
grottes
grottes
grottes
cote i.G.n des differents niveaux sur l'emprise du barrage R.6
415
410
405
400
395
390
385
381
380
375
370
365
galerie R.6
strate
galerie R.6
65 m
60 m
50 m
40 m
35 m
30 m
25 m
20 m
15 m
10 m.
5 m.
0

A l'amont du site du barrage, le canyon suit un tracé en baïonnette influencé, de toute évidence, par ce système d'accidents.

2.3. KARSTIFICATION

La prospection des indices karstiques a donné les résultats suivants (fig. 2) :

- dans le canyon, à l'amont du site, 25 cavités ont été repérées et topographiées. Elles se répartissent dans les parois à différents niveaux. Elles sont toutes situées à moins de 500 m du site du barrage.
- En rive gauche, dans la falaise qui domine la plaine de QUINSON, 4 cavités, situées à la cote 430, ont été repérées et topographiées.

Ces cavités sont d'importance réduite. La plus grande a un développement de 30 m. Ce sont des cavités fossiles caractérisées par l'absence de circulation; elles ont eu une évolution complexe. On distingue très nettement (comme dans toutes les grottes de la région) les traces d'une phase de colmatage qui a rempli les cavités à 95 %. Une phase de décolmatage ultérieur a enlevé en partie ces dépôts. Au-delà de quelques dizaines de mètres, la pénétration se heurte à un concrétionnement et à un colmatage important, et, pour certaines, à des éboulements. Toutes les cavités sont situées dans quelques niveaux privilégiés.

A l'amont immédiat du barrage, le canyon est orienté E-W. Dans ce tronçon, toutes les grottes sont situées rive droite.

La grotte de la BONNE BAUME est la cavité la plus célèbre de ce groupe (fig. 3). C'est un site préhistorique d'importance régionale. Les dépôts les plus anciens, au contact du bed-rock, sont datés du Wurm. D'après l'auteur de cette datation, la localisation des grottes en rive droite est due à l'orientation de la rive droite du canyon vers le Sud (Lumley (H. de) 1965).

La localisation et la forte concentration des grottes près de la faille de QUINSON ne sont peut-être pas un effet du hasard. Le rôle d'écran joué par le remplissage étanche du fossé avant son décolmatage a peut-être été déterminant.

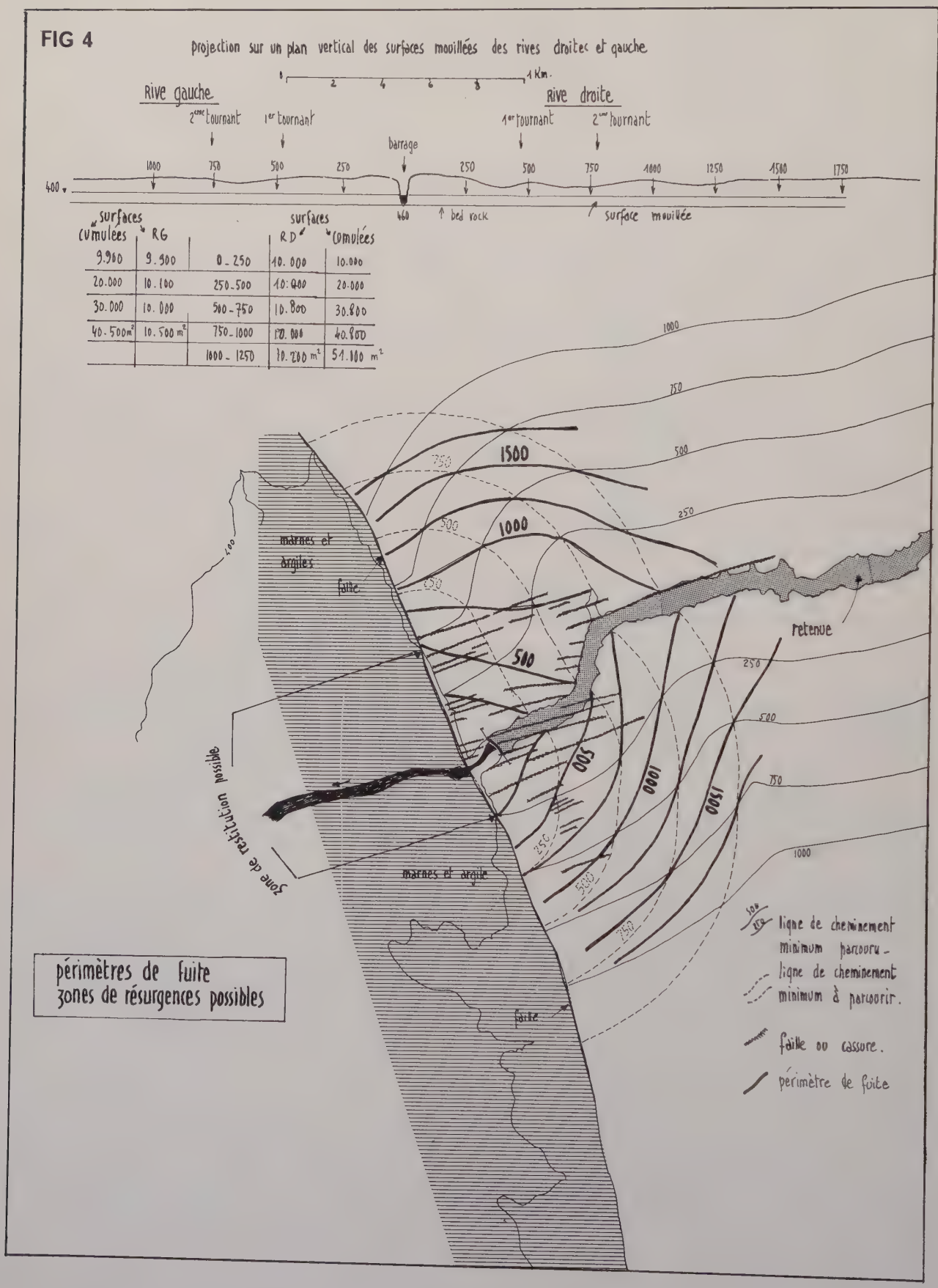
Remarque : La retenue du barrage actuel a son plan d'eau à la cote 374. Avant la réalisation de cet ouvrage, le VERDON coulait à la cote 364 environ. Il est vraisemblable que des entrées de grottes et peut-être des sources ont été noyées lors de la mise en eau. Les grottes actuellement accessibles ne sont que des cavités suspendues par rapport au niveau naturel de la vallée. Il est logique que ces grottes soient des cavités fossiles.

2.4. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

Le VERDON joue le rôle de niveau de base.

Les eaux tombées sur les zones calcaires sont restituées au VERDON par des écoulements souterrains.

FIG 4


Projection sur un plan vertical des surfaces mouillées des rives droite et gauche
1 Km.
Rive gauche
Rive droite
2ème tournant
1er tournant
barrage
1er tournant
2ème tournant
1000 750 500 250 250 500 750 1000 1250 1500 1750
400
460
bed rock
surface mouillée
surfaces cumulées
RG
surfaces RD cumulées
0 - 250 10.000 10.000
250 - 500 10.400 20.000
500 - 750 10.800 30.800
750 - 1000 10.000 40.800
1000 - 1250 10.280 m² 51.180 m²
9.900 9.900
20.000 10.100
30.000 10.000
40.500m² 10.500 m²
1500
1000
500
marnes et argiles
faille
retenue
zone de restitution possible
marnes et argile
périmètres de fuite
zones de résurgences possibles
ligne de cheminement minimum parcouru -
ligne de cheminement minimum à parcourir.
faille ou cassure.
périmètre de fuite

Dans l'emprise de la retenue,les principales sources connues sont :

- la source de la FLUO (35 1/s), située à l'amont de la retenue,
- la source de SAINT LAURENT qui débouche dans la retenue (5 1/s ?),
- la source du PONT (1 1/s) (ordre de grandeur).

Ces 3 sources sont situées à l'amont de la retenue du barrage actuel. Elles sortent sous le niveau du VERDON et sont, pour cela, très difficilement décelables. La source de la FLUO par exemple, a été trouvée grâce à une coloration. Il est bien évident que, tout le long des gorges, de nombreuses sources inconnues ramènent au VERDON les eaux infiltrées sur les plateaux. L'ensemble de ces apports karstiques doit dépasser 500 1/s.

Différentes colorations ont, en partie, localisé les zones d'alimentation de la source de "SAINT LAURENT" et de la source de la "FLUO".

La source du PONT présente la particularité d'avoir une eau à une température de 16°, alors que la température moyenne des sources karstiques de la région est de 13° environ. L'origine des eaux de cette source n'a pu, jusqu'ici, être établie.

3 - TRAITEMENTS - MISE EN EAU - BILAN

● Traitement d'étanchéité

L'ouvrage ancien est caractérisé par l'absence de tout traitement d'étanchéité.

Le barrage en construction sera complété par un rideau d'injection qui traitera le rocher jusqu'à 50 m sous le fond de fouille.

● Mise en eau de l'ouvrage ancien

La retenue créée par l'ouvrage ancien ne présente aucune fuite, exception faite des circulations observées sous le barrage, à travers les alluvions qui ont servi partiellement de fondation à l'ouvrage.

● Possibilités de fuites - Cheminements possibles à partir de la future retenue

Les zones de restitution :

1) Les zones proches : elles sont de surface extrêmement réduite, et localisées à proximité même de l'ouvrage en raison de la présence des marnes éocènes qui remontent rapidement au-dessus de la cote 400 sur chacune des deux rives (fig. 4).
2) Les zones lointaines : cette hypothèse est citée pour mémoire, car ce risque paraît peu envisageable.

Les surfaces mouillées : Le tableau, fig. 4, donne les différentes valeurs des surfaces mouillées pour les périmètres de fuites de 0 à 1250 m.

Les types de circulations : deux possibilités peuvent être envisagées :

1) Circulation par les grands accidents amont-aval

La longueur des cheminements serait de l'ordre de 750 m. La mise en eau du barrage ancien peut être considérée comme un test de perméabilité pour ces accidents qui n'ont donné lieu à aucune fuite.

L'étanchéité de ces accidents a été confirmée par les essais d'eau (type Lugeon) exécutés en sondages.

2) Circulation dans des réseaux karstiques

Cette hypothèse suppose un trajet dans un réseau karstique continu non colmaté de plus de 300 m de long ; elle doit être envisagée.

L'examen des galeries de reconnaissance et des tunnels d'accès et de dérivation provisoire a montré que la karstification est localisée dans quelques joints bien individualisés. Les conduits d'interstrates repérés sont toujours de faibles dimensions. On peut donc envisager que des circulations s'établissent, après la mise en eau, dans certains joints, mais les débits transités devraient rester faibles.

Les seules fuites notables ne pourraient provenir que de circulations par des cheminements très courts, empruntant des cassures et des joints proches du versant. Dans ce cas, les fuites apparaîtraient dans le canyon même, à l'aval immédiat de l'ouvrage. L'importance de ce risque est liée à la qualité du voile d'injection.

°
° °

CHAPITRE

17

LA RETENUE DU BARRAGE DE

Sainte_Croix

(France)

PLAN

1 - Généralités

- Introduction
- Caractéristiques de l'ouvrage et de la retenue
- Le problème de l'étanchéité
- La karstification régionale

2 - Le cadre naturel

3 - Risques de fuites - Cheminements possibles

4 - Conclusions - Les fuites possibles

°
° °

Figure 1 : Géologie, hydrogéologie régionale, 1 : 200 000

Figure 2 : Géologie et hydrogéologie du site, 1 : 20 000

Figure 3 : Paléogéographie régionale, 1 : 200 000

Figure 4 : Coupes structurales

Figure 5 : Coupe du site, voile d'étanchéité

Figure 6 : Hydrogéologie et périmètres de fuites, 1 : 20 000

Figure 7 : Surfaces mouillées

Photo : Vue aérienne du site depuis l'aval

°
° °

Bibliographie :

- Rapports Division Géologie Géotechnique - Electricité de France - Inédits
- MENESSIER G. (1959) : Etude tectonique des confins alpino-provençaux entre le VERDON et l'ARGENS (thèse de doctorat) - Mémoires de la Société Géologique de France - Tome XXXVIII - Fasc. 4 - Mémoire n° 87 - Pages 1 à 174 - Pl. I à VIII.

RESUME

Le barrage voûte de SAINTE-CROIX (hauteur 95 m.) actuellement en construction, est situé sur le VERDON (Alpes du Sud - FRANCE).

L'ampleur des phénomènes karstiques régionaux a longtemps retardé la réalisation de cet ouvrage. Par exemple, à l'amont immédiat de l'ouvrage, la source karstique de FONTAINE LEVEQUE a un débit moyen de 6,3 m³/s. et constitue le principal affluent du VERDON. L'histoire du karst explique sa complexité. A l'OLIGOCENE, une karstification intense affecte les massifs calcaires, au MIO-PLIOCENE, des dépôts marno-graveleux recouvrent en grande partie la région. Ces dépôts s'accompagnent de déformations tectoniques; le karst est en partie colmaté et en même temps désorganisé. Au QUATERNAIRE, l'érosion creuse le réseau hydrographique actuel et remet en activité certaines parties des réseaux anciens.

Le site du barrage est situé 600 m. à l'aval de l'entrée d'une gorge creusée dans un anticlinal calcaire, transverse au VERDON (l'anticlinal de BAUDINARD). Cet anticlinal dissymétrique plonge rapidement à l'amont; il ferme une vaste plaine (longueur 10 km., largeur 3 km.) creusée dans des marnes et des conglomérats. C'est dans cette plaine que se développera la majeure partie de la retenue. Les eaux de la retenue mouilleront, à l'amont immédiat de l'ouvrage, les parois calcaires du Canyon et sur les deux rives, la retombée amont de l'anticlinal. Plus à l'amont en rive gauche, les eaux mouilleront d'autres structures calcaires, dégagées de leur couverture marneuse et parallèles à l'anticlinal de BAUDINARD. Les calcaires de l'anticlinal de BAUDINARD et des massifs de la rive gauche de la retenue sont d'âge jurassique supérieur. Ce sont des calcaires massifs (exemple : les appuis du barrage) surmontés par des calcaires lités dans lesquels de minces joints marneux s'intercalent.

Dans la gorge de BAUDINARD, 70 grottes ont été explorées, soit un total de plus de 2.400 m. de galeries. Ces grottes sont pour la plupart localisées dans les premières assises litées qui surmontent les calcaires massifs. Ce sont presque exclusivement des conduits de joints, peu concrétionnés et partiellement colmatés par des argiles rouges.

L'hydrogéologie régionale est dominée par le système karstique de FONTAINE-LEVEQUE. Les études ont permis de préciser l'étendue (450km².) et la localisation du bassin d'alimentation (colorations)ainsi que le régime des eaux (vitesses d'écoulement, mises en charges). Près du barrage, les études hydrogéologiques ont mis en évidence les principaux caractères des écoulements souterrains de l'anticlinal de BAUDINARD. En rive droite, existe une nappe de fissure alimentée par les précipitations et le VERDON (débit 30 l/s. - vitesse 100 m./h. - l'exutoire est une source karstique). Cette nappe réagit à une faible élévation du plan d'eau amont (mini- mise en eau).

Risques de fuite : par leur nature et leur continuité, tous les calcaires mouillés sont suspects. L'existence du réseau de FONTAINE-LEVEQUE pouvait faire craindre soit des fuites vers le Sud, soit un déficit des apports après remplissage de la retenue. Compte tenu des expériences réalisées, ce risque paraît très faible. Près du barrage, des risques de fuite existent sur les deux rives. En rive gauche, des fuites importantes paraissent peu probables en raison de la nature des calcaires et de la longueur des lignes de fuite. En rive droite, par contre, les caractères géologiques du massif, l'existence d'un système de drainage, et les résultats de la mini-mise en eau conduisent à envisager des débits de fuite voisins de 1 m³/s. Ces fuites pourraient ressortir soit à proximité de l'ouvrage (250 m.) soit à la source de la FLUO, exutoire du système de drainage naturel du massif.

°°°

SUMMARY

SAINTE CROIX dam, an arch dam 95 m high now under construction, lies on the VERDON in the southern French Alps.

Building the dam was put off for a long time because of the extent of karstification in the region. For example, FONTAINE L'EVEQUE karst spring immediately upstream of the dam has a discharge of 6.3 m3/s and forms the VERDON 's main tributary. The history of the karstification explains its complexity. There was intense karstification in the limestones in the OLIGOCENE and marly-gritty deposits covered a large part of the region in the MIOCENE, and this was accompanied by tectonic deformations that partly blocked and disrupted the karst systems. In the QUATERNARY, erosion cut the present hydrographic network and re-opened parts of the older karst systems.

The dam site is 600 m downstream from the entrance to a gorge cut through a limestone anticline transverse to the VERDON (the BAUDINARD anticline). It is asymmetric and dips steeply upstream. It forms the boundary to a vast plain 10 km long and 3 km wide cut in marls and conglomerates. It is in this plain that most of the reservoir will be situated : it will submerge the limestone wall of the canyon immediately upstream of the dam, and the upstream limb of the anticline on either bank. On the left bank farther upstream, the water will be in contact with other limestone structures parallel to the BAUDINARD anticline which have lost their marl mantle. The limestones of the BAUDINARD anticline and the rocks on the left shore of the lake date from the Upper Jurassic - these are massive limestones (e.g. those forming the abutments to the dam) overlain by bedded limestones interspersed with thin marlaceous beds.

Seventy caves have been explored in the BAUDINARD gorge, the aggregate length of the galleries being more than 2400 m. They usually occur in the first bedded layers overlying the massive limestones. They are usually exclusively joint pipes with little concretion and partially plugged with red clay.

The regional hydrogeology is dominated by the FONTAINE L'EVEQUE karst system. Studies has shown the extent (450 km2) and position of the basin feeding it water tracing and the flow conditions within it (flow velocity, pressure). Hydrogeological surveys near the dam have provided information on the main characteristics of underground flow in the BAUDINARD anticline. There is a fracture aquifer on the right bank fed by rainfall and the VERDON (flow rate 30 litres/s, flow velocity 100 m/hour, outlet through a karst spring). This water level reacts to small rises in the reservoir level (miniature impoundings).

As regards the risk of leakage, all the limestones in contact with the lake are suspect because of their nature and their continuity. The FONTAINE l'EVEQUE system indicated the possibility of leakage occuring towards the south or an inflow deficit once the reservoir was filled. But the liklihood of this seems small from the tests that were done. Near the dam, there are leakage possibilities on both banks. Major leakage seems unlikely on the left bank because of the nature of the limestones there and the lengths of the seepage paths. But on the right bank, the geological characteristics of the rocks, the existence of an underground drainage system and the results of the miniature impoundings show that leakage of about 1 m3/s has to be considered. This could re-emerge either near the dam (within 250 m) or at FLUO spring which is the outlet from the natural drainage system.

Photo R. THEROND

LE SITE DU BARRAGE DE SAINTE CROIX
Vue aérienne depuis l'aval

1 : La plaine des Salles
2 : Le site de l'ouvrage
3 : L'émergence de Fontaine l'Evêque
4 : La grotte de l'Eglise (entrée)

On distingue la régularité des couches calcaires, l'absence de raccordement au Verdon des affluents dont les vallées restent suspendues au-dessus du canyon.

1 - GENERALITES

● INTRODUCTION

Le barrage de SAINTE CROIX actuellement en construction sera mis en eau à l'automne 1973. Il est situé sur le VERDON à proximité de l'entrée des gorges de BAUDINARD. Par sa capacité, cette retenue sera la deuxième de France après celle du barrage de SERRE-PONÇON.

La topographie du site et de la cuvette est exceptionnellement favorable à la réalisation d'une retenue de grande capacité ; un barrage de 100 m de haut et de 150 m de développement en crête aurait permis, par exemple, de créer une retenue dont la capacité aurait dépassé un milliard de m3.

Depuis un siècle, ce site a retenu l'attention des constructeurs ; mais la karstification spectaculaire des formations calcaires qui constituent la totalité de la rive gauche de la cuvette ainsi qu'une partie de la rive droite, posait un problème d'étanchéité difficile à résoudre, sans mettre en péril l'économie du projet.

● CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE ET DE LA RETENUE

Barrage voûte mince
Hauteur maximale : 95 m
Longueur en crête : 138 m
Cote de la crête : 483,00 NGF
Volume de l'ouvrage : 50.000 m3

Retenue :
Longueur amont-aval du plan d'eau : 11 km
Largeur moyenne : 1,5 km
Capacité : 767 x 10^6 m3
Cote normale de la retenue : 477 NGF

● LE PROBLEME DE L'ETANCHEITE

Les principales données du problème sont les suivantes :

- Les phénomènes karstiques régionaux sont parmi les plus importants et les plus spectaculaires d'Europe.
- Les apports naturels sont faibles (le débit moyen annuel du VERDON à SAINTE CROIX ne dépasse pas 30 m3/s) ; l'économie du projet n'est pas compatible avec des pertes importantes.
- Le volume de la retenue nécessite deux ans pour le remplissage, ce qui interdit pratiquement toute vidange pour réaliser des travaux d'étanchement.

(Il faut rappeler que le traitement des fuites karstiques en charge, c'est-à-dire sans vidanger une retenue, n'est pas une technique confirmée).

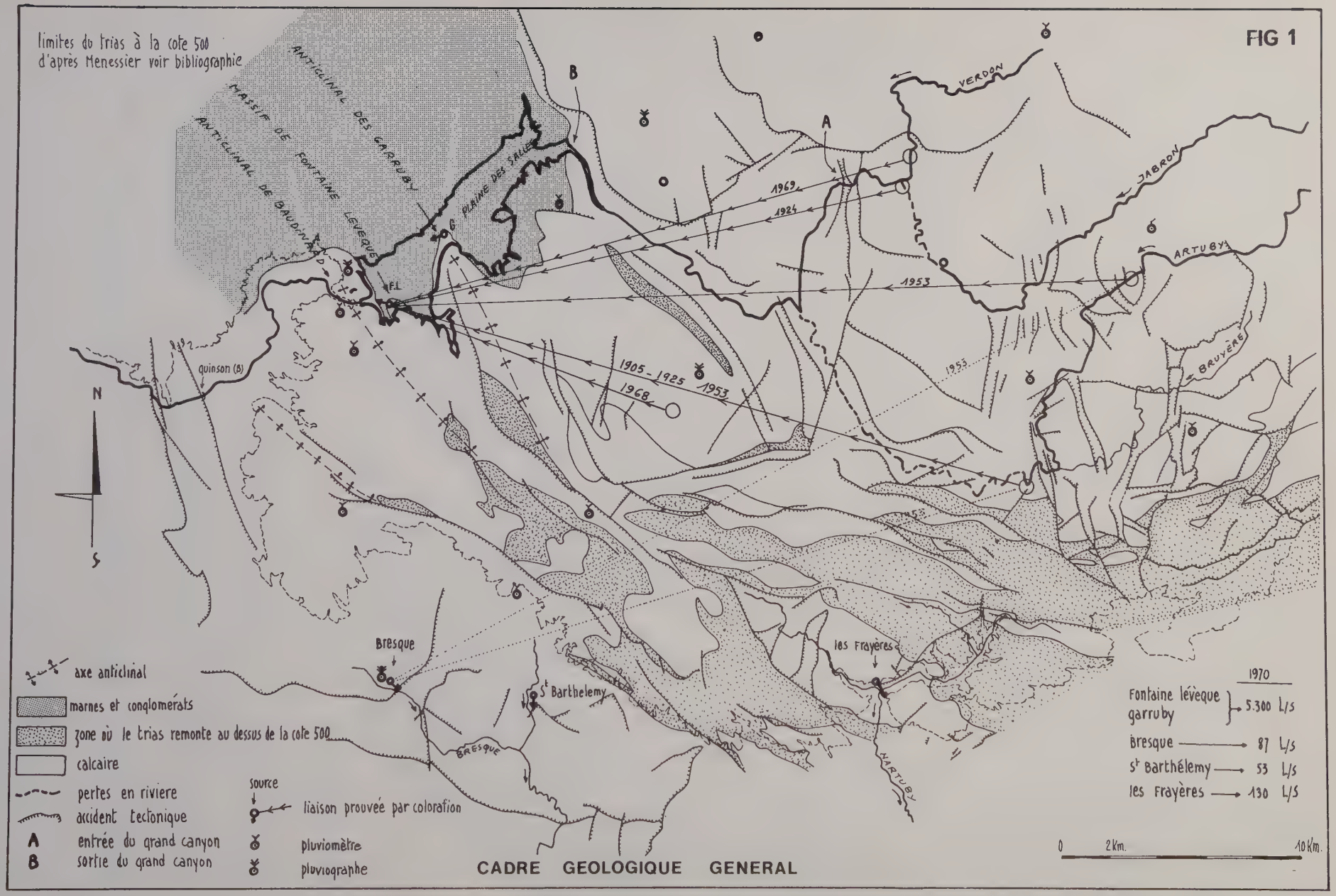


FIG 1
limites du trias à la cote 500
d'après Menessier voir bibliographie
ANTICLINAL DES GARRUBY
MASSIF DE FONTAINE LEVEQUES
ANTICLINAL DE BAUDINARD
PLAINE DES TAILLES
VERDON
JABRON
ARTUBY
GRUYÈRE
1969
1924
1953
1905 - 1925
1968
quinson (B)
Bresque
St Barthelemy
les Frayères
A
B
N
S
axe anticlinal
marnes et conglomérats
zone où le trias remonte au dessus de la cote 500
calcaire
pertes en riviere
accident tectonique
entrée du grand canyon
sortie du grand canyon
source
liaison prouvée par colorafion
pluviomètre
pluviographe
1970
Fontaine lévêque garruby 5.300 L/s
Bresque 87 L/s
St Barthélemy 53 L/s
les Frayères 130 L/s
0 2 km. 10 km.
CADRE GEOLOGIQUE GENERAL

Les conséquences logiques de ces données sont les suivantes :

- d'une part, la probabilité d'être en présence de fuites économiquement non acceptables ne peut être négligée ;
- d'autre part, l'impossibilité de vidanger la retenue pour traiter le terrain implique (avec les difficultés que cela comporte) de définir, de localiser et de réaliser (tout au moins en partie) les travaux d'étanchement indispensables avant la mise en eau.

Toutes ces sujétions expliquent l'importance du problème de l'étanchéité de cette retenue et le fait que ce site exceptionnel soit resté non équipé jusqu'à aujourd'hui.

● LA KARSTIFICATION REGIONALE (résumé) (1)

Les massifs calcaires qui forment toute la rive gauche de la cuvette (fig. 1) et une partie de la rive droite à proximité de l'ouvrage, sont l'extrémité Nord des grandes unités calcaires qui constituent une partie des PLANS de PROVENCE. C'est là qu'aboutissent les grands réseaux karstiques actifs qui drainent l'arrière pays.

Les sources (GARRUBY, FONTAINE L'EVEQUE, SAMBUC) sont les exutoires de ces grands réseaux ; elles constituent avec un débit annuel moyen de 6,3 m3/s, le principal affluent du VERDON.

La carte fig. 1 est une coupe du terrain arasé à la cote 500. Elle précise la situation des zones qui alimentent les sources et met en évidence l'importance des trajets souterrains vérifiés par coloration (2). On remarque également que les affluents du VERDON, situés à l'amont de la retenue (JABRON, ARTUBY), n'atteignent leur confluent que d'une façon intermittente.

La figure 2 (carte géologique des gorges de BAUDINARD) montre également, à une plus grande échelle, l'importance et le type des circulations souterraines dans le massif de BAUDINARD qui constitue les appuis du barrage.

● <u>Génèse du karst régional</u>

La karstification actuelle des massifs calcaires est le résultat d'une évolution hydrogéologique et karstique complexe pratiquement ininterrompue depuis l'Oligocène (35.000.000 d'années).

A l'Oligocène, une phase de karstification intense a affecté les massifs calcaires dénudés. La région présentait à cette époque l'aspect d'une pénéplaine calcaire drainée vers le Nord-Ouest.

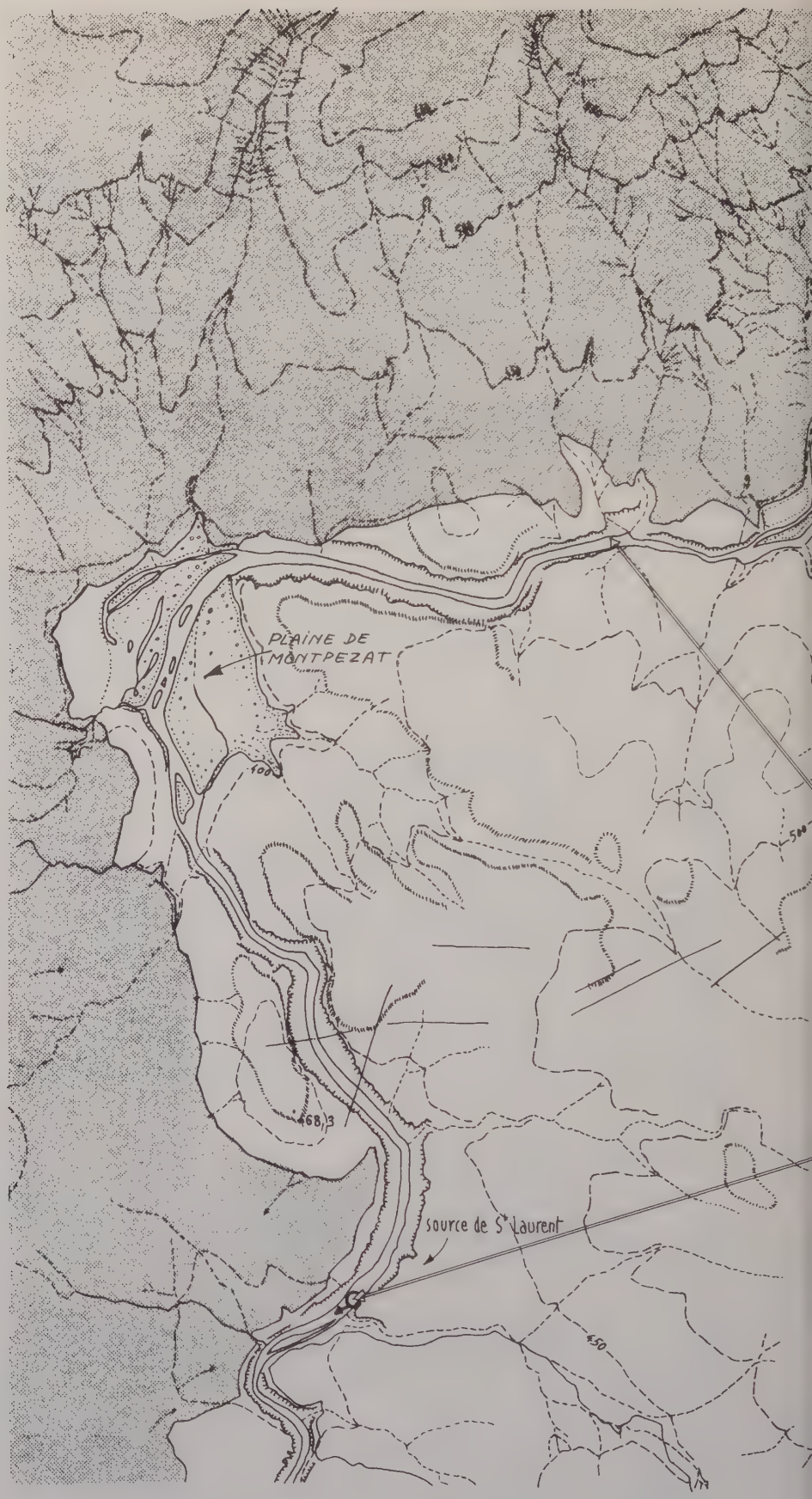
(1) *Voir également chapitre 16 "La retenue du barrage de QUINSON".*

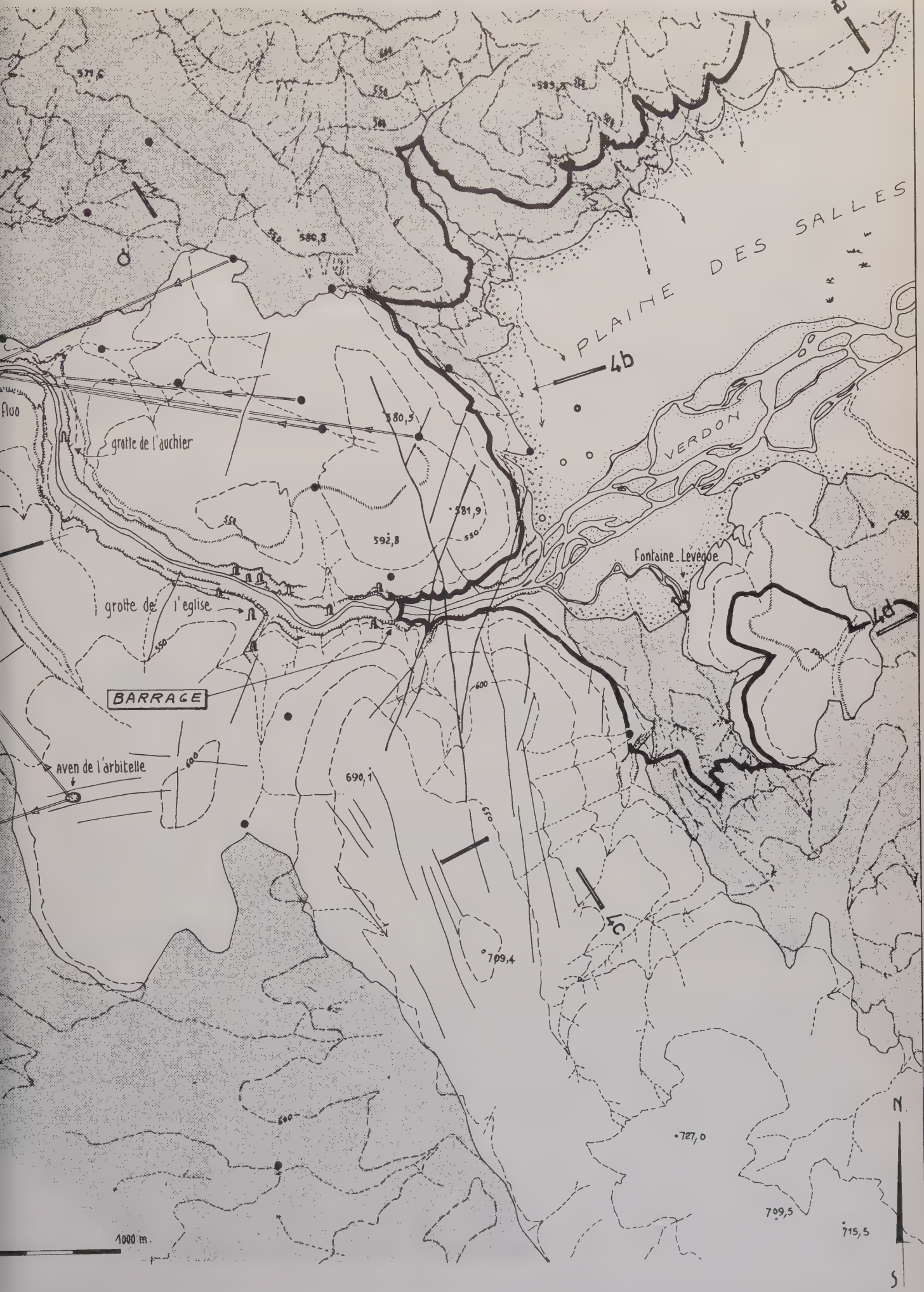
(2) *Rappelons que ces colorations et FONTAINE L'EVEQUE ont été évoquées et décrites dans la première partie, chapitres 2 et 3.*

FIG 2

géologie

le massif de baudinard




PLAINE DES SALLES
VERDON
fluo
grotte de l'auchier
grotte de l'eglise
BARRAGE
aven de l'arbitelle
Fontaine-Levegoe
580,8
580,5
581,9
592,8
690,1
709,4
727,0
709,5
715,5
4a
4b
4c
4d
1000 m.
N.
S

Une vaste dépression, située au Nord du VERDON actuel, recevait vraisemblablement les eaux et les apports solides des massifs calcaires environnants.

Au Miocène-Pliocène, des dépôts marno-graveleux commencèrent à se déposer en grande quantité dans cette dépression (1). Ces dépôts constituent aujourd'hui le plateau conglomératique de RIEZ-VALENSOLE.

Des mouvements tectoniques ont accompagné cette longue période de dépôt. Le centre de la zone de sédimentation s'enfonça tandis que des déformations affectèrent les massifs calcaires qui encadraient le plateau (2).

La karstification (1) qui se poursuit alors dans les massifs calcaires exposés, est doublement perturbée ; premièrement, par les déformations tectoniques (fig. 3) qui modifient les structures, deuxièmement par la fossilisation des réseaux karstiques situés dans les massifs calcaires qui disparaissent sous les formations marno-graveleuses. La figure 3 montre l'extension minimum vers le Sud des dépôts marno-graveleux avant le creusement de la vallée du VERDON.

Au Quaternaire, le réseau hydrographique actuel se met en place ; la sédimentation prend fin ; l'érosion du VERDON creuse la plaine des SALLES et dégage une partie des massifs calcaires de la couverture marneuse qui les recouvrait (anticlinal de BAUDINARD, massif des GARRUBY, massif de FONTAINE L'EVEQUE).

Le drainage karstique des massifs calcaires se modifie et s'adapte à la nouvelle morphologie ; le niveau de base s'abaisse ; une karstification quaternaire se développe ; les anciens réseaux sont partiellement décolmatés et réutilisés par les eaux souterraines.

Les systèmes karstiques fonctionnels ou non, actuellement connus, peuvent ainsi avoir des origines diverses : ils peuvent être anté-miocènes et fossiles ou anté-miocènes et remaniés, ou simplement quaternaires. Dans la majorité des cas, il est difficile de définir exactement l'âge d'une cavité.

2 - LE CADRE NATUREL

2.1. MORPHOLOGIE

La morphologie de la cuvette reflète la géologie ; 3 zones peuvent être individualisées (fig. 1) :

(1) Des dépôts de précipitation carbonatés (pisolithes, calcaires lacustres) s'intercalent localement entre les dépôts marneux, mettant en évidence la poursuite de la karstification dans l'arrière pays.

(2) Ce sont les déformations des marnes et des conglomérats dans les zones de bordure qui mettent le mieux en évidence ces mouvements.

a) une zone amont : c'est la partie aval du grand canyon du VERDON qui entaille les PLANS de PROVENCE. La gorge s'est creusée dans une structure anticlinale calcaire.

b) une zone centrale : c'est la plaine des SALLES ; elle constitue la majeure partie de la cuvette. La coupe 4a, fig. 4, est caractéristique de la structure et de la morphologie de cette zone. Le VERDON a creusé les matériaux meubles. Dégagés de leur couverture, les massifs calcaires constituent la rive gauche de la cuvette.

c) une zone aval : ce sont les gorges de BAUDINARD (photo). A l'aval de la plaine des SALLES, le VERDON, qui a profondément entaillé l'anticlinal de BAUDINARD après l'avoir débarrassé en grande partie de sa couverture de marnes et de conglomérats, coule au fond d'un canyon aux parois verticales de plus de 100 m de profondeur. Au niveau de la rivière, la largeur dépasse rarement 30 m (coupes 4b, 4c).

L'anticlinal de BAUDINARD présente une structure à double rayon de courbure, caractérisée par un plongement brutal des couches vers l'Est (coupe 4b) et par un plongement régulier de l'axe vers le Nord (coupe 4c).

Ces déformations sont contemporaines du dépôt des conglomérats de RIEZ VALENSOLE et se sont poursuivies vraisemblablement jusqu'au début du Quaternaire.

L'emplacement retenu pour le barrage est exactement sur l'axe de l'anticlinal.

2.2. GEOLOGIE

Les formations calcaires karstiques qui constituent les appuis de barrage (au sens large) et la rive gauche de la retenue sont dans leur grande majorité d'âge jurassique. En quelques endroits, le Crétacé inférieur calcaire et marno-calcaire affleure.

La première formation franchement marneuse est constituée par l'Argovien (fig. 4, coupes 4b, 4c) ; elle n'affleure pas dans l'emprise de la retenue : elle a été recoupée par sondages. L'épaisseur des formations calcaires qui la surmontent dépasse 400 m.

• Pétrographie - Lithologie

A la hauteur de l'ouvrage (fig. 5), on distingue :

- à la base, une assise I, de 200 m de puissance, constituée par des calcaires massifs très purs : 99,5 % de $CaCO_3$, 0,5 % de $MgCO_3$;
- au-dessus, les assises II, III et IV (220 m de puissance) constituées par des couches de calcaires purs à grains fins, d'épaisseur moyenne (de 10 cm à 1 m). Ces couches sont fréquemment séparées par des niveaux de marnes vertes de 1 à 3 cm d'épaisseur.

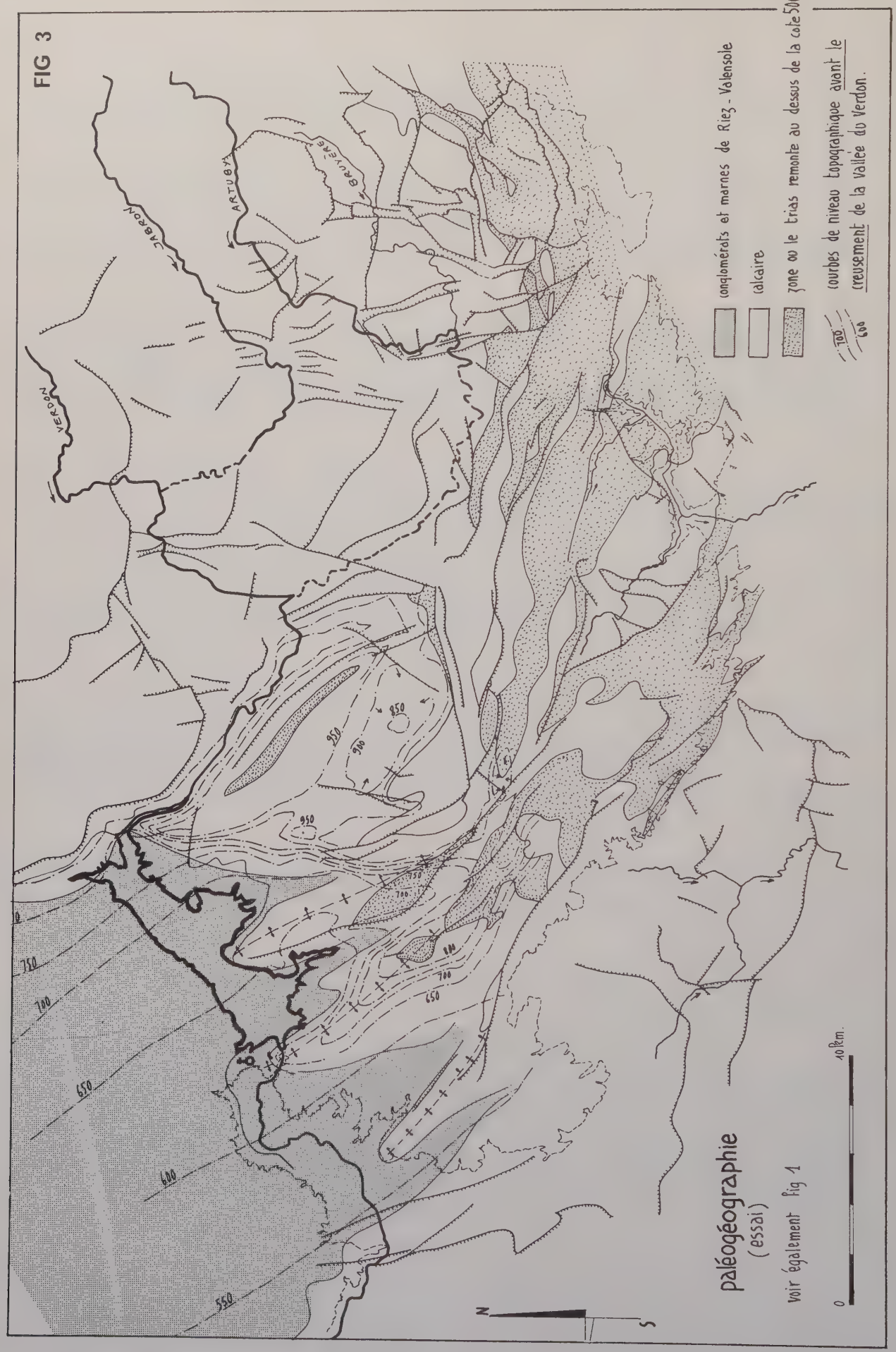


FIG 3
VERDON
JABRON
ARTUBY
BRAUX
conglomérats et marnes de Riez - Valensole
calcaire
zone ou le trias remonte au dessus de la cote 500
courbes de niveau topographique avant le creusement de la vallée du Verdon.
paléogéographie
(essai)
Voir également Fig 1
N
S
0
10 Km.

● La karstification locale

- Bilan des recherches sur le karst dans la zone du barrage

Dans les gorges de BAUDINARD, à proximité et à l'aval de l'ouvrage, le bilan des prospections et des explorations menées dans le cadre des études, est donné par le tableau suivant :

	nombre d'ouvertures karstiques	longueur cumulée des galeries pénétrables
rive gauche	46	2100 m
rive droite	25	355 m

La plus grande des cavités connues est la grotte de l'EGLISE (fig. 2) ; c'est d'ailleurs le réseau le plus important des gorges du VERDON à l'aval de FONTAINE L'EVEQUE.

- Localisation (fig. 2)

A quelques exceptions près, les cavités sont localisées dans l'assise II. Elles sont toutes situées à l'aval de l'axe de l'anticlinal de BAUDINARD.

- Morphologie des cavités

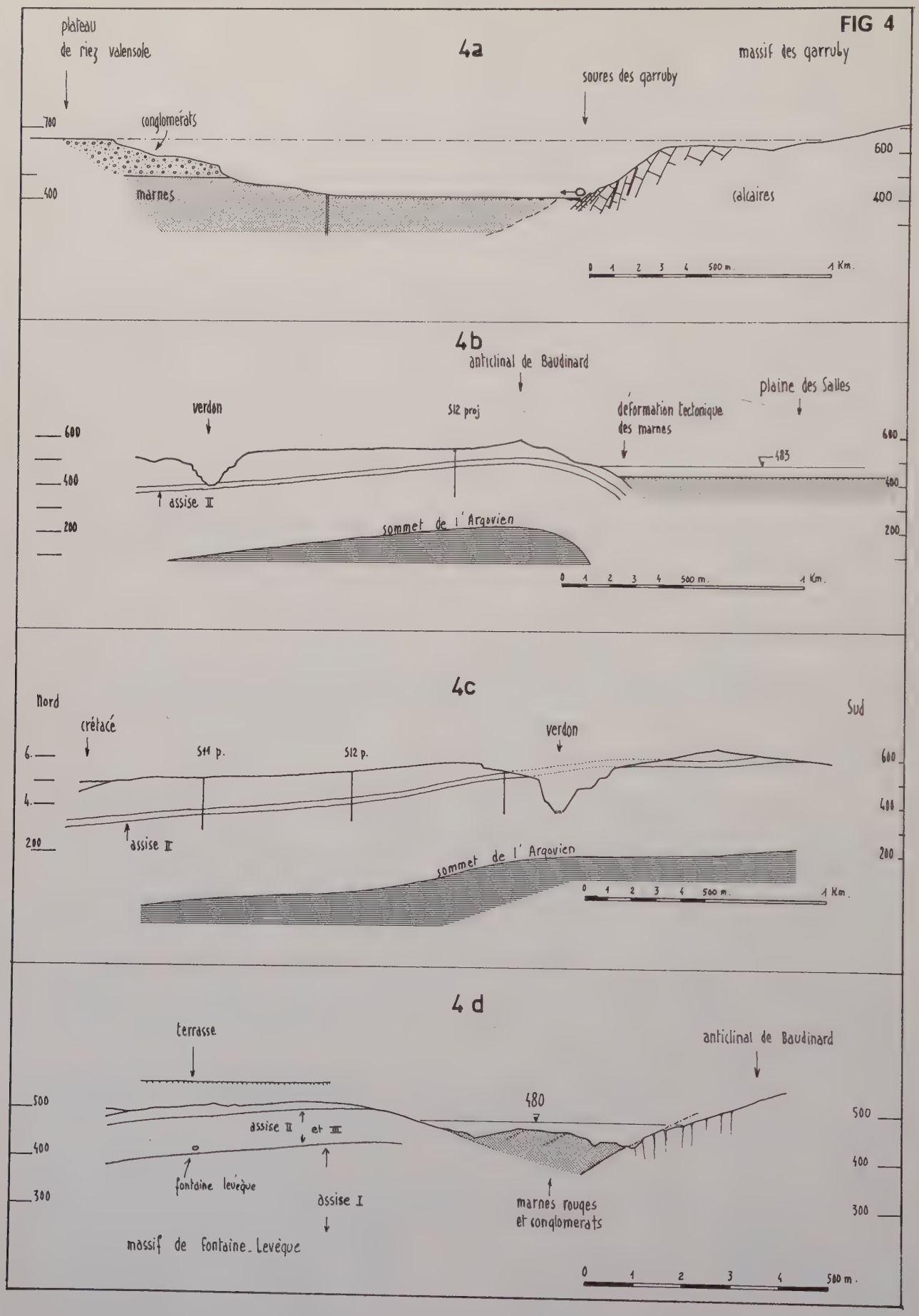
Les grottes explorées sont dans leur grande majorité des grottes non actives. La plupart d'entre elles sont des conduits de joints, de taille importante (5 à 10 m2 de section en moyenne). Les concrétions sont rares ; le sol est généralement recouvert d'argile rouge desséchée (photos 18, 19 : 1ère partie). Un seul réseau actif est connu. Son émergence, la grotte de la FLUO (1), n'a pu être explorée que sur quelques mètres.

A la hauteur de l'ouvrage, les travaux ont mis à jour quelques cavités appartenant au karst quaternaire ; les galeries de reconnaissance ont également recoupé, à plusieurs reprises, des poches karstiques témoins des karsts anté-quaternaires. Ces cavités colmatées à 95-100 %, paraissent antérieures aux dernières déformations tectoniques.

Certains joints karstifiés paraissent également avoir rejoué après la mise en place des argiles rouges d'origine karstique.

(1) *Voir chapitre 16 "La retenue du barrage de QUINSON".*

FIG 4


4a
plateau
de riez valensole
massif des garruby
soures des garruby
780
conglomérats
400
marnes
600
400
calcaires
0 1 2 3 4 500 m. 1 Km.
4b
anticlinal de Baudinard
plaine des Salles
verdon
S12 proj
déformation tectonique
des marnes
483
600
400
200
assise II
sommet de l'Argovien
0 1 2 3 4 500 m. 1 Km.
4c
Nord
Sud
crétacé
S11 p.
S12 p.
verdon
6.
4.
200
assise II
sommet de l'Argovien
0 1 2 3 4 500 m. 1 Km.
4 d
terrasse
anticlinal de Baudinard
500
400
300
assise II et III
480
fontaine levèque
assise I
marnes rouges
et conglomerats
massif de fontaine-Levèque
0 1 2 3 4 500 m.

● Hydrogéologie

A la hauteur de l'ouvrage et à l'aval, le VERDON constitue le niveau de base régional.

L'hydrogéologie karstique a été étudiée à deux échelles.

A) A l'échelle régionale

La figure 1 présente le dispositif d'observation régionale et une partie du bilan des observations effectuées sur les grands systèmes karstiques.

La source de FONTAINE L'EVEQUE a fait l'objet d'études particulières (voir chapitre 3, 1ère partie). Rappelons que le caractère le plus remarquable du système de FONTAINE L'EVEQUE est la régularité exceptionnelle du débit de la source (1).

Les colorations positives permettent de localiser en partie l'extension du réseau drainant de FONTAINE L'EVEQUE. Il comprend de toute évidence tous les grands plans calcaires situés au Nord de la barrière constituée par les formations triasiques (fig. 1).

Les colorations positives, à partir du VERDON, ont montré que ce dernier n'est pas la limite Nord du bassin versant et que les massifs calcaires situés au Nord du VERDON peuvent également participer à l'alimentation de FONTAINE L'EVEQUE.

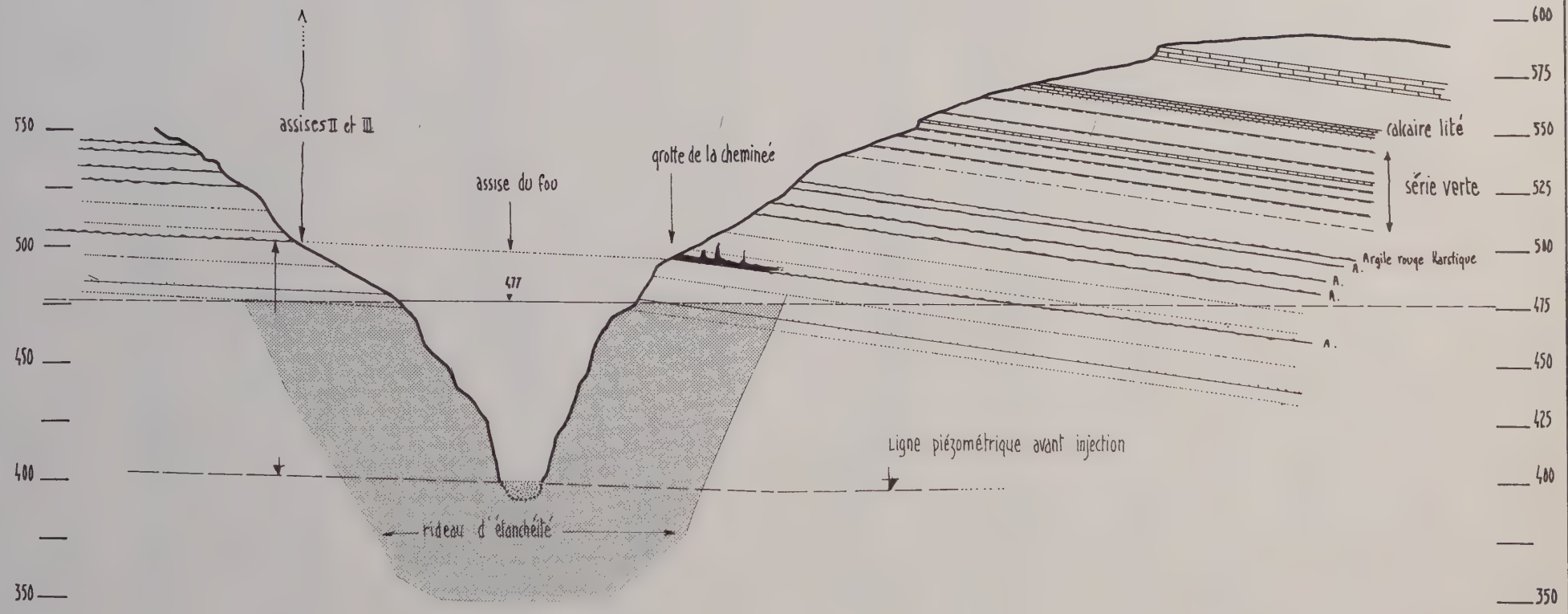
Le tableau ci-dessous indique, pour les principales sources, le bassin d'alimentation minimum :

	débit moyen 1970	bassin versant théorique
FONTAINE L'EVEQUE GARRUBY SAMBUC	5.267 1/s	450 km2
BRESQUE	87 1/s	8 km2
SAINT BARTHELEMY	53 1/s	5 km2
LES FRAYERES	130 1/s	12 km2

De toute évidence, sans entrer dans le détail, les massifs calcaires situés à proximité même des sources de BRESQUE, SAINT BARTHELEMY et les FRAYERES, sont suffisants pour assurer l'alimentation de ces sources, sans faire appel à des zones d'alimentation situées dans le bassin versant topographique du VERDON.

(1) *La régularité du débit apparaît comme la conséquence de deux faits :*
1) l'extension du bassin versant qui module l'arrivée des apports,
2) le soutien des débits d'étiage par les pertes en rivière : VERDON, JABRON, ARTUBY.

FIG 5



_COUPE LITHOLOGIQUE

_EXTENSION DU VOILE D'ETANCHEITE

B) Hydrogéologie de l'anticlinal de BAUDINARD

La figure 2 montre l'importance du dispositif mis en place pour étudier l'hydrogéologie de l'anticlinal de BAUDINARD (1).

La figure 6 présente les principaux résultats obtenus :

- mise en évidence et forme de la nappe de fissures qui draine la rive droite ;
- localisation des points de restitution des eaux (grotte de la FLUO), vitesse de circulation des eaux souterraines (sur la rive droite) ;
- existence de circulations souterraines rive gauche et points de restitution de celles-ci dans le VERDON.

● "Mini-mise en eau"

La "mini-mise en eau", réalisée dans le cadre des études hydrogéologiques et effectuée durant l'été 1971 par mise en place d'un batardeau à l'entrée de la dérivation provisoire, a permis de maintenir pendant 3 semaines le niveau de l'eau à l'amont du barrage (batardeau), à la cote 405. Avant la manoeuvre, l'eau coulait à la cote 400 environ.

Cette opération a été réalisée en période sèche ; le comportement des nappes de fissures (rive droite et rive gauche) qui était suivi par des piézomètres à enregistrement continu, a permis d'analyser l'influence de cette mise en eau sans qu'il y ait perturbation par les pluies.

Bilan :

Rive droite, la nappe de fissures réagit à la mise en eau. La stabilisation n'est acquise qu'après 3 semaines ; la remontée du plan d'eau est de l'ordre de 1 m (pour une montée de 5 m du plan d'eau) ; la vitesse de circulation des écoulements souterrains dans la rive droite augmente de 10 % environ. A la grotte de la FLUO, les variations de débit ne sont cependant pas décelables. La mesure des débits à la source de la grotte de la FLUO est très difficile car l'eau arrive sous le niveau du VERDON par des griffons multiples.

Cet essai confirme que les circulations de la rive droite sont en partie alimentées par les eaux du VERDON.

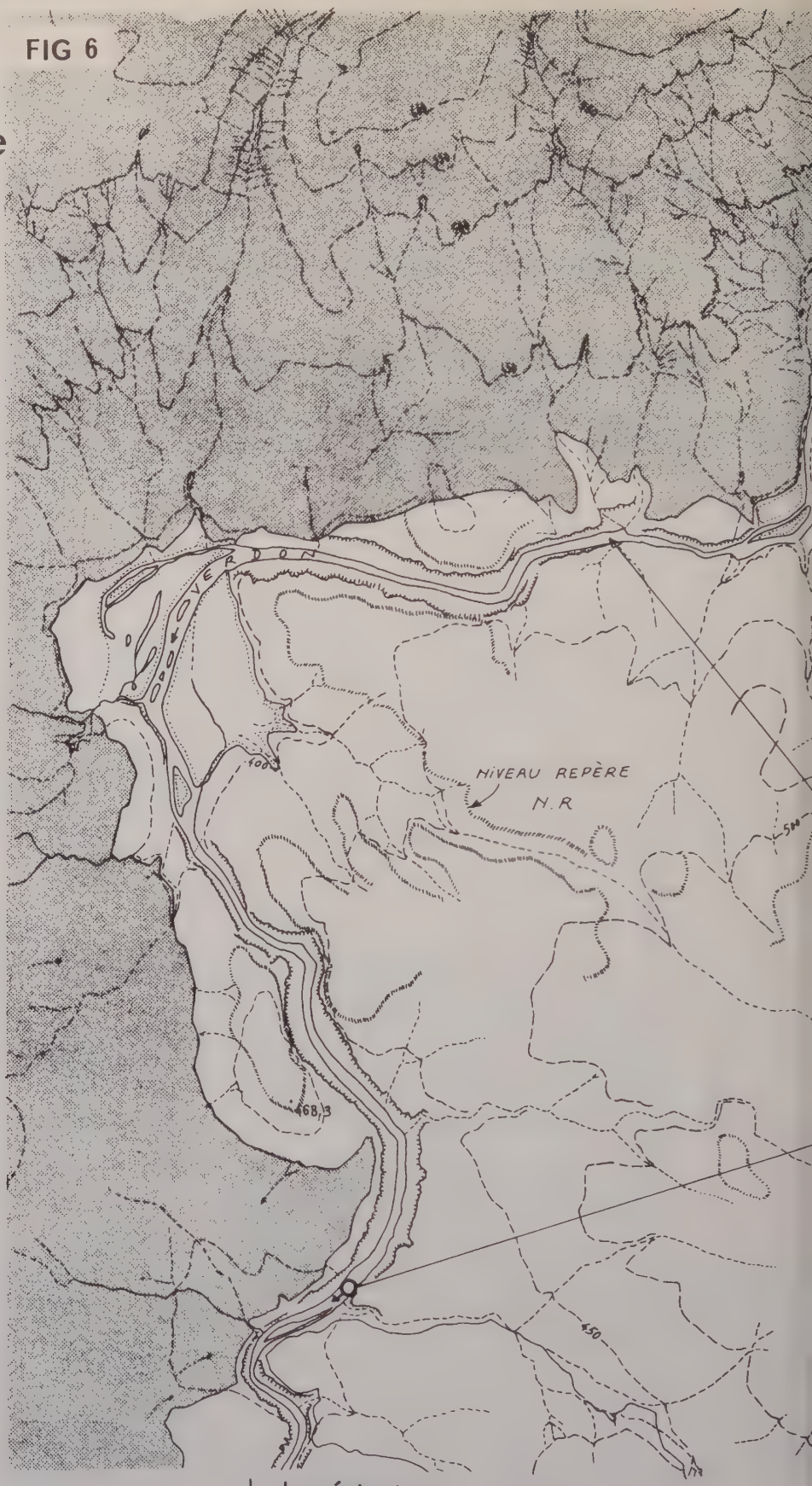
La lenteur des réactions montre cependant que, dans la zone testée par l'essai, il n'existe pas de by-pass largement ouvert. Rive gauche, la nappe réagit très légèrement (20 cm) avec un retard de plusieurs jours ; les colorations restent négatives.

(1) *Au total, plus de 80 sondages ont été réalisés sur ce massif. Seuls, sont portés sur la carte, les sondages qui sont utilisés pour étudier l'hydrogéologie du massif.*

hydrogéologie

périmètres de fuite

FIG 6



hydrogéologie

- calcaires
- marnes et conglomérats
- alluvions
- aven
- source

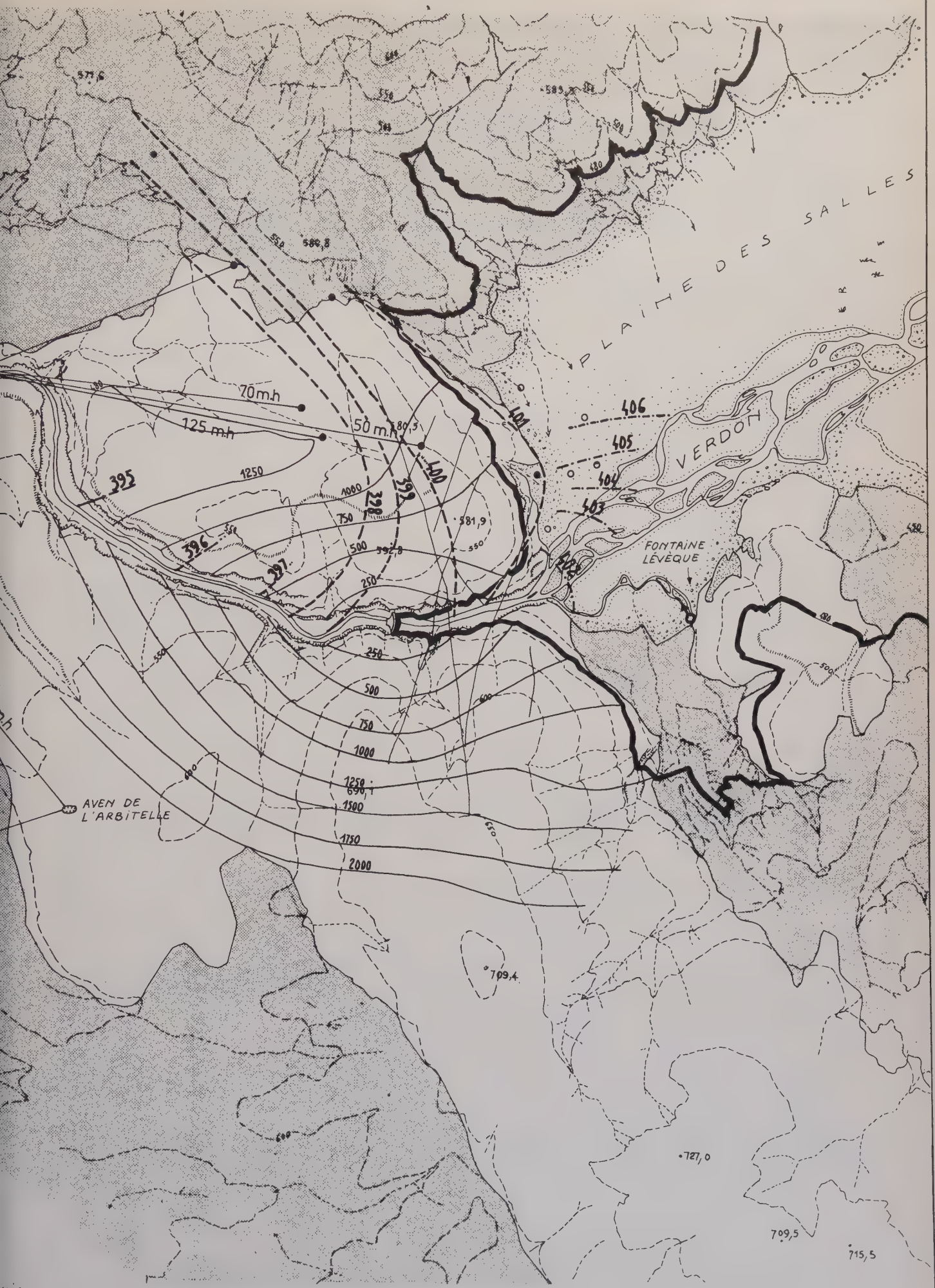
250 périmètre de fuite

coloration positive

70 m/h vitesse de propagation

402 / 397 courbe piézométrique de la nappe allu

" " " " " " " " dan


PLAINE DES SALLES
VERDON
FONTAINE LÉVÊQUE
AVEN DE L'ARBITELLE
70 m.h
125 m.h
50 m.h
395
396
397
398
399
400
401
403
404
405
406
1250
1000
750
500
250
1500
1750
2000
709,4
727,0
709,5
715,5

caire..

3 - RISQUES DE FUITES - CHEMINEMENTS POSSIBLES

● Les formations suspectes :

Exception faite des formations du plateau de VALENSOLE, toutes les formations calcaires mouillées par la retenue sont suspectes ; les marnes rouges de l'Eocène (fossé de BAUDUEN) sont étanches mais leur extension en surface est limitée et, compte tenu de leur structure synclinale, leur seul rôle est de réduire la surface des sections de circulation.

● Cheminements possibles :

L'ampleur des circulations souterraines connues conduit à examiner la possibilité de circulations à très grande distance.

- Hypothèse 1 : circulations à grande distance vers le Sud et vers la NARTUBY (fig. 1).

Deux mécanismes ont été envisagés :

1a) déversement hors de la cuvette des eaux de la retenue empruntant des conduits karstiques actifs ou fossiles.

1b) déficit permanent ou périodique d'alimentation des réseaux affluents souterrains par engorgement puis déversement vers le Sud par des réseaux actuellement non actifs.

- Hypothèse 2 : fuites par contournement du barrage avec résurgence dans la vallée du VERDON.

● Degré de probabilité des risques envisagés :

- Hypothèse 1 : Fuites à grande distance

Elles impliquent dans l'hypothèse 1a)l'existence de réseaux continus à une cote inférieure à la cote de la retenue.

Les études hydrogéologiques ont révélé les faits suivants :

- Le bassin versant de FONTAINE L'EVEQUE se développe vers l'Est et le Sud-Est et non pas vers le Sud où se situent les zones éventuelles de restitution.
- La figure 1 montre que seuls des cheminements complexes permettraient d'envisager des fuites vers le Sud (sauf à proximité de l'anticlinal de BAUDINARD). Ces cheminements sont encore plus improbables si on note que la figure 1 a été dessinée à partir de 3 hypothèses contraignantes :
  1) l'Argovien n'est pas considéré comme étanche ;
  2) la coupe est faite à la cote 500 pour un plan d'eau à 477 NGF ;
  3) les structures synclinales ne sont pas reportées car elles ne sont pas des écrans ; cependant, elles réduisent les sections de passage.
- Les circulations karstiques actuelles s'effectuent à des cotes relativement élevées : pour les débits de crues annuelles (10 m3/s à FONTAINE L'EVEQUE), la piézométrie est de 427 à FONTAINE L'EVEQUE et de 440 aux GARRUBY.

- Les essais de fermeture de FONTAINE L'EVEQUE (1) ont montré par ailleurs que pour ces piézométries naturelles mesurées aux émergences, la piézométrie dans le réseau atteignait des cotes supérieures ou égales à la cote de la future retenue sans faire apparaître de sources temporaires, hors de bassin versant. L'apparition de fuites vers le Sud hors du bassin versant du VERDON apparaît donc hautement improbable.

- Hypothèse 2 : Fuites par les rives avec résurgences au VERDON

La figure 6 met en évidence la dissymétrie des périmètres de fuites rive droite et rive gauche.

Les caractères de la rive gauche sont les suivants :

- les lignes de fuites deviennent rapidement longues. En raison de la structure de l'anticlinal, l'assise II (la plus suspecte) s'élève au-dessus de la cote de la retenue au niveau de l'axe anticlinal ;
- la fissuration est perpendiculaire au VERDON ;
- la piézométrie actuelle s'établit au-dessus du niveau du VERDON ;
- la surface de la zone mouillée est relativement faible (fig. 7) ;
- Il faut rappeler cependant que la nappe réagit (bien que faiblement) à la mini-mise en eau. Compte tenu de toutes les observations, il faut, pour qu'il y ait des fuites importantes par cette rive avec contournement du voile, imaginer un cheminement long, continu et efficace dans l'assise I. Cette hypothèse paraît improbable. Seules des fuites de faible débit peuvent être envisagées.

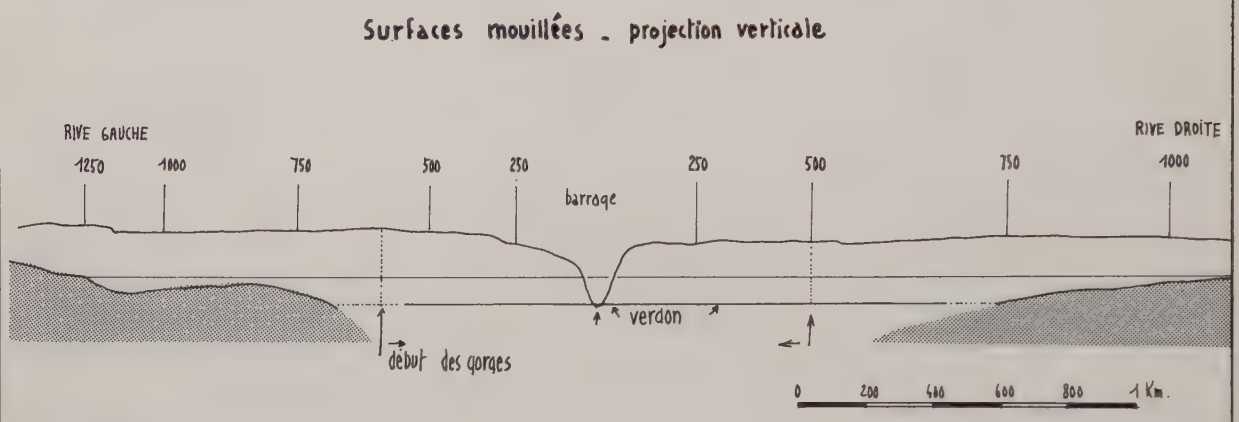
Les caractères de la rive droite sont les suivants :

- la longueur des lignes de fuites est courte en raison de la morphologie de la rive ;
- l'assise II se développe depuis la retenue jusqu'à l'aval au-dessous de la cote 477. A la hauteur du S12, l'assise II est au niveau du VERDON. Le plan (fig. 5) met en évidence le plongement rapide de l'assise II à la hauteur du barrage. A 175 m de la crête du barrage, l'assise du FOU descend au-dessous du niveau 477.
- la rive droite est actuellement drainée par un réseau qui débouche à la grotte de la FLUO ;
- les vitesses de circulation des eaux souterraines sont élevées : 70 à 125 m/h ;
- la surface mouillée est relativement élevée ;
- l'influence du VERDON sur la nappe a été mise en évidence.

Toutes ces observations montrent que le risque de fuites n'est pas négligeable.

(1) *La fermeture totale des vannes de FONTAINE L'EVEQUE a été réalisée au printemps 1972 pour un débit supérieur à 13 m3/s. Pour ce débit, le réseau était noyé jusqu'à la cote 465 environ.*

FIG 7



cheminements minimum.	RG	RD
0 . 250	19.200	24.000
250 . 500	20.800	27.200
500 . 750	30.400	46.400
750 . 1000	10.000	19.200
1000 . 1250	6.400	2.000
TOTAL	86.800 m²	118.800 m²
surface réelle x 2	173.600 m²	237.600 m²

Les données défavorables sont en partie contrebalancées par les faits suivants :

- le karst antémiocène a été désorganisé par la remontée (plus de 100 m) de l'anticlinal, durant le dépôt des marnes ;
- l'anticlinal a été dégagé tardivement de sa couverture marneuse. Le karst quaternaire est donc jeune ; il s'est organisé par rapport à la morphologie actuelle.

4 - CONCLUSIONS - LES FUITES POSSIBLES

En l'absence de traitement au large, on doit envisager que la mise en eau puisse s'accompagner de fuites en rive droite (1).

Les fuites possibles sont de deux types :

1) Fuites à courte distance avec résurgences à l'aval immédiat du barrage (de 200 à 250 m au maximum) :

Ces fuites correspondraient à des infiltrations dans l'assise du FOU (fig. 5).

Les circulations s'effectueraient à proximité du versant dans la zone du karst de versant.

Les résurgences se situeraient au niveau de l'assise du FOU, à proximité ou à l'intérieur des premières grottes situées à l'aval du barrage (grottes jumelles, etc.). Pour des circulations de ce type, les risques de débourrage et d'évolution seraient importants.

2) Fuites à moyenne distance, avec résurgences au niveau du VERDON :

Les résurgences pourraient apparaître, par exemple, à la grotte de l'AUCHIER ou plus certainement à la grotte de la FLUO. Pour des fuites de ce type, les risques de débourrage seraient plus faibles, les débits pourraient être non négligeables, ordre de grandeur : 1,5 m3/s.

°
° °

(1) *Ces conclusions s'appuient sur les conclusions de la 3ème partie "Bilans et synthèse".*

3eme
partie

BILANS ET SYNTHESE

3me PARTIE

BILANS ET SYNTHESE

plan

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION : Vue d'ensemble des retenues étudiées - Tableau récapitulatif

Chapitre 1 : LES MONOGRAPHIES - BILANS - Essai de classement

Chapitres 2 et 3 : LES MISES EN EAU - BILANS - Retenues étanches - Retenues non-étanches

Chapitre 2 : LES RETENUES ETANCHES

Chapitre 3 : LES RETENUES NON-ETANCHES

Chapitre 4 : SYNTHESE

Chapitre 5 : CONCLUSIONS GENERALES

°
° °

Avant_propos

Le plan adopté comprend une introduction et 5 chapitres.

L'introduction présente, sous forme d'un tableau, une vue d'ensemble de toutes les retenues analysées dans la deuxième partie.

Ce tableau récapitulatif aurait pu constituer le dernier chapitre de la deuxième partie. Il a cependant paru préférable de le placer en tête de la troisième partie afin que la lecture de la première et troisième parties forme un tout indépendant, dans une large mesure, de la deuxième partie qui peut alors être considérée comme une annexe analytique.

Le chapitre 1 est un essai de codification et de classification des différentes caractéristiques des retenues. Pour chacune de ces caractéristiques (morphologie, lithologie, ...), des critères directement liés à la karstification permettent de définir différents groupes ; ces groupes constituent le schéma de classement de cette caractéristique. Il y a donc référence permanente à la première partie dans ce premier chapitre.

Le chapitre 2 est consacré aux retenues étanches et essaie d'en dégager les caractères spécifiques.

Le chapitre 3 est consacré aux retenues non étanches et plus particulièrement à l'analyse des caractères de la fuite karstique.

Le chapitre 4 aborde les essais de synthèse. La nature de la fuite karstique est définie ainsi que les conséquences et les règles pratiques qui peuvent être déduites de cette définition. Dans ce chapitre, les problèmes hydrogéologiques liés à la création des retenues, sont également abordés.

Enfin, le chapitre 5 présente d'abord les conclusions générales qui sont un rappel des points acquis (idées nouvelles, vérification des idées anciennes), et ensuite les conséquences qui peuvent en être tirées pour l'étude de l'étanchéité d'une retenue.

°
° °

introduction

VUE D'ENSEMBLE DES RETENUES ETUDIEES
TABLEAU RECAPITULATIF

Le tableau (fig. 1) permet d'avoir une vue d'ensemble des caractéristiques des retenues étudiées dans la deuxième partie.

Afin d'en faciliter la lecture, les ouvrages sont cités dans l'ordre de présentation adopté dans la deuxième partie. Les caractéristiques - géologie, karstification, etc. - sont également ordonnées selon le plan généralement suivi dans les monographies.

Notice explicative

L'obligation de définir une caractéristique en quelques mots ou par un chiffre a nécessité un certain nombre de choix.

Volume de la retenue

Le chiffre indiqué est celui de la capacité maximale de la retenue ; c'est le volume maximum qu'il sera nécessaire de vidanger, le cas échéant, pour améliorer par tapis ou par injection l'étanchéité du terrain.

Morphologie

La morphologie du site et des abords immédiats de l'ouvrage est définie par le terme morphologique le plus représentatif, canyon, clue (1), gorge, ...

Le mode de creusement est généralement précisé : fluvial, glaciaire, etc. Pour certaines retenues, la position de l'ouvrage par rapport au site défini est également indiquée (ex : entrée de canyon).

(1) *Une clue est un défilé rocheux assez court (200 à 300 m au maximum) qui correspond au franchissement par la rivière d'une série dure (calcaire) généralement redressée, intercalée dans des formations tendres. La clue s'oppose au canyon ou à la gorge, termes qui impliquent un développement amont-aval de grande longueur.*

Lithologie, pétrographie

Les seules informations portées sur le tableau sont la nature pétrographique de la roche (calcaire, dolomie, marno-calcaire, ...) et la puissance des bancs (bancs massifs, séries litées, ...).

Structure

La structure définie est celle de l'unité géologique où se développe la retenue (tabulaire, synclinale, isoclinale, complexe, ...). Le terme synclinal est utilisé lorsque la rivière coule en suivant l'axe du synclinal (ex : retenue de CHARMINE-MOUX).

Fracturation

Comme il n'est pas possible de définir en quelques mots la fracturation d'un massif rocheux, seuls l'intensité moyenne (forte, faible, ...) et les caractères exceptionnels sont précisés.

Karstification

Seul le type morphologique le plus fréquent des cavités karstiques du massif rocheux est défini par un mot : fissures (karst de ...), joints (karst de ...) ; exceptionnellement, le terme de salle est utilisé quand de grandes cavités existent dans le massif. Les termes : actif-fossile, colmaté-non colmaté, définissent une tendance générale.

Hydrologie, hydrogéologie

Deux caractères seulement sont précisés :

a) le rôle de niveau de base joué ou non par la rivière sur laquelle se développe la retenue ;

b) l'existence de sources à l'aval de l'ouvrage ; il faut préciser que seules les sources qui ne sont pas séparées de la retenue par un écran étanche sont signalées. En l'absence de source, aucune indication n'est portée.

Traitements

Les chiffres inscrits expriment la quantité de matière sèche injectée ; il s'agit de moyenne générale ou de fourchette (maximum, minimum).

Mise en eau, fuites

Le chiffre inscrit est la valeur maximale du débit de l'ensemble des fuites. La distance est la distance en ligne droite du barrage à la résurgence principale.

Evolution

Deux cas ont été distingués :

a) il y a augmentation régulière (linéaire en général) du débit de fuites avec la montée du plan d'eau (BOUVANTE par exemple) ;

b) le débit de fuites augmente rapidement à partir d'une certaine cote du plan d'eau (seuil).

Les autres indications se passent de commentaires.

°
° °

Le signe * indique qu'il faut se reporter à la colonne " Commentaires - Remarques "

FIG 1

NOM DU BARRAGE	CARACTÉRISTIQUES			MORPHOLOGIE DU SITE ET DE LA RETENUE	GÉOLOGIE			KARSTIFICATION		
	Hauteur	type	(retenue) Volume $10^6 m^3$		LITHOLOGIE PÉTROGRAPH-IE	STRUCTURE DE L'UNITÉ	FRACTURATION	PRINCIPAUX TYPES DE CAVITÉS	DÉVELOPPE-MENT	ACTIV actif/
CAMARASA ESPAGNE	92 m.	Voute	157	vallée fluviale, sortie de canyon.	dolomie * calc. dol. massif et stratifié	unité tabulaire série sub. horizontale 17° aval	moyenne cassures AM^t - Aval verticales	fissures et poches avec sable dol.	généralisé dans la mas-se	acti
BOUVANTE FRANCE	38 m.	poids	1,3	vallée glaciaire, clue et canyon à l'aval.	calc. massif. et marno-calc.	complexe pendage AM^t 45°	intense transverse à la vallée	fissures petites poches	moyen.	acti
MONTE JAQUE ESPAGNE	73,5 m.	Voute	36	polje et entrée d'un canyon.	calc. et marno-calc.	complexe	intense et généralisée	fissures, gr^{des} galeries salles.	très développé et généralisé*	acti
GÉNISSIAT FRANCE	104 m.	poids	55	vallée fluvio-glaciaire (canyon).	calc. massif	synclinal à fond plat.	très réduite.	poches * petits avens	local moyen	fossi
CHARMINE-MOUX FRANCE	18 m. *	poids	5 *	vallée fluvio-glaciaire *	calc. massif	synclinal en gouttière.	moyenne	fissures et conduits (joints)	localement très important	acti
CASTILLON FRANCE	100 m.	Voute	149	vallée fluviale, site à l'entrée d'un canyon.	calc. massif et lité.	série isoclinale pendage AM^t.	cassures importantes en R.D	fissures	localement important	actif
LA CHAUDANNE FRANCE	70 m.	Voute	16	vallée fluviale, clue.	calc. massif et lité.	anticlinal complexe.	généralisée (calcite)	fissures	faible	acti
CANELLES ESPAGNE	148 m.	Voute	678	vallée fluviale, site à la sortie d'un canyon	calc. massif et lité	série isocli. P. 40° AM^t	intensité exceptionnelle amt-aval verticales.	fissures et salles	très important rive gauche	actif
KARAOUN LIBAN	60 m.	enroch^t	220	vallée tectonique, site à la rupture de pente du profil en long de la riv.	calc. massif marno-calc. dolomie	complexe	moyenne	poches et fissures	moyen	partiel ment
NÉBAANA TUNISIE	62,5 m.	enroch^t	86	vallée fluviale clue.	calcaire massif et lité marno-calcaire	complexe (anticlinal)	généralisée (calcite)	fissures	faible	actif
GRÉOUX FRANCE	64 m.	enroch^t	80	vallée fluviale canyon en V	calc. massif. et stratifié	Tabulaire P # 4°	moyenne très régulière	fissures et conduits de joints.	important	fossile sur les vers
VOUGLANS FRANCE	130 m.	Voute	600	vallée fluviale, site à la sortie d'un canyon.	calc. et calc. dolomitiq-ue	synclinal à fond plat	moyenne qlq. grdes failles	fissures et conduits de joints.	tres develo-ppé r.d.	actif
CEYRAC * FRANCE	20 m.	poids	7	vallée fluviale début d'une zone de méandres.	calcaire et calc. marneux	série sub horizontale	nombreux accidents	conduits de joints - fiss-ures - avens	important et généralisé	actif
CONQUEYRAC * FRANCE	17 m.	enroch^t		vallée fluviale début d'une zone de méandres.	calcaire et calcaire. marn.	série sub. horizontale	nbres cassures qlqs failles	lapiaz fissures.	important et généralisé	acti
QUINSON * FRANCE	15 m. * 54,5 m.	Voute	18,6	vallée fluviale sortie d'un canyon.	calc. lité et calc. massif.	tabulaire	cassures amt-aval. imptes	fissures qlqs conduits de joints.	moyen, local-lement impor-tant.	en pa fossi
SAINTE-CROIX FRANCE	90 m.	Voute	800	vallée fluviale entrée d'un canyon.	calc. massif et lité	anticlinal dissymétrique	accidents transverses à la vallée.	conduits de joints.	moyen, local-lement impor-tant.	actif partie

tableau récapitulatif

YDROLOGIE DRO GÉOLOGIE	TRAITEMENT AVANT MISE EN EAU			MISE EN EAU CARACTÉRISTIQUES des fuites			TRAITEMENT	COMMENTAIRES REMARQUES
	surface du voile	consommation au m^2	au m de forage	DÉBIT MAXIMUM	DISTANCE minimale à la retenue.	ÉVOLUTION après la mise en eau.	DES FUITES	
ivière est niveau de . sources à l'aval te.				12 m^3/s	100 à 1300 m.	augmente avec H(1)	Voile 650 Kg/m² 288.000 m^2	C'est le seul ouvrage construit sur des dolomies.
e en rivière à l'aval diat du barrage ?				1,1 m^3/s	5500 m.	augmente avec H	tapis de béton dans la cuvette	
e en rivière _ défi- du bassin_versant.				4 m^3/s		augmente avec H	tapis et traite_ments de surface localisés	dolines _ estavelles riv. souterraine de 4 km.
iv. est niveau de base méabilité très faible.		23 Kg	30 à 50 Kg.	NÉANT	–	–	–	Karst fossile ancien. Tapis naturel étanche.
te en riv. ? * ces à l'aval.				800 l/s	1200 m.	augmente après debo_-ouvrage.	injection par un forage. 5000 m^2 de tapis.	Le barrage est situé à une rupture de pente du profil en long de la rivière.
riv. est niveau de base	46.000 m^2	41 à 200 Kg.	115 à 560 Kg.	100 l/s	1000 m.?			Importance et localisation des fuites mal connues
. est niveau de base.	26.000 m^2	30 Kg.	200 Kg.	NÉANT	–	–	–	–
. est niveau de base.				8 m^3/s	300 m.	augmente avec H (linéairement)	voile d'injection complémentaire	fuites spectaculaires. évolution brutale avec débourrage.
v. est niveau de base. mont du barrage pertes riv.				300 l/s	? *	augmente avec H (seuil)	néant	fuite à grande distance théoriquement possible.
. est niveau de base	110.000 m^2	130 Kg.		100 l/s	1200 m.	augmente avec H. Non linéaire.	jointoyage des fissures en R.G	L'importance attribuée aux fuites est liée à la valeur de l'eau.
v. est niveau de base	26.000 m^2		800* Kg. 400 Kg.	NÉANT	–	–	–	* Consommation élevée dans les 20 premiers mètres
. est niveau de base ces à l'aval.	30.000 m^2	45 Kg.	106 Kg.	300 l/s	1500 m	augmente avec H		Débit de fuite mal connu.
v. n'est pas le niveau base.				NÉANT?	–	–	–	barrage écrêteur de crue sans voile.
riv. n'est pas le nive_ de base.								barrage écrêteur de crue en projet.
v. est le niveau de . Source à l'aval.	* NÉANT			NÉANT*	–	–	–	* ouvrage existant 15 m. ouvrage en projet 54,5 m.
v. est le niveau de . Source à l'aval.	50.000 m^2 (estimation)			* NON ÉVALUÉ				

CHAPITRE

1

Les monographies-bilans

ESSAI DE CLASSEMENT

PLAN

1 - Les ouvrages
2 - Morphologies
3 - Structures et tectonique
4 - Lithologie, pétrographie, stratigraphie
5 - Fracturation
6 - Karstification
7 - Hydrologie, hydrogéologie
8 - Bilan général

°
° °

RESUME

Le type d'ouvrage: Sur les 16 barrages présentés, 4 sont des barrages en enrochements, 4 des barrages poids, 8 des barrages voûtes. Pour l'étude de l'étanchéité d'une retenue, les barrages voûtes présentent un double avantage : d'une part l'ampleur des reconnaissances nécessaires pour étudier les appuis fournit une bonne connaissance du karst; d'autre part la faible emprise de l'ouvrage permet une meilleure surveillance de la mise en eau.

Morphologie : deux critères de classement ont été utilisés :
a) nature des zones mouillées par rapport au schéma du système karstique,
b) épaisseur des terrains au-dessus des zones où se produisent les circulations souterraines. En pratique, l'utilisation du premier critère nécessite de préciser également si les réseaux hydrographiques de surface sont surimposés ou non à d'anciens paysages karstiques; il faut également faire des distinctions morphologiques. Le deuxième critère est d'un emploi simple.

Structure, Tectonique : 4 types de structure permettent de classer tous les sites : structure en gouttière, structure isoclinale, structure tabulaire, et structure complexe. Ce classement est indépendant de l'importance du risque de fuite.

Lithologie : Les caractères spécifiques de la dolomie, nécessitent, malgré des difficultés pratiques, de faire la distinction - site sur calcaires - site sur formations dolomitiques. Cinq faciès-type permettent de classer toutes les formations : les calcaires purs massifs, les calcaires purs stratifiés, les calcaires marneux massifs, les calcaires marneux bien stratifiés, les dolomies.

Fracturation : Le classement se fait en tenant compte de l'intensité du type de la fracturation et de la nature du remplissage.

Karstification : La définition de la karstification implique de préciser en premier lieu 4 caractéristiques : l'intensité, le type morphologique, le degré d'activité, l'exposition aux eaux météoriques des massifs calcaires. A partir de ces quatre caractéristiques, les retenues peuvent être réparties en 4 groupes : 1. karstification importante, karst actif; 2. karstification faible, karst actif; 3. karstification fossile; 4. karstification moyenne.

Hydrologie, Hydrogéologie : Une séparation fondamentale des retenues en deux groupes doit être faite à partir du caractère suivant : La rivière sur laquelle est construit l'ouvrage joue le rôle de collecteur de surface des eaux karstiques souterraines (1er groupe); Dans la négative (2ème groupe) la rivière alimente les circulations souterraines. Les retenues du premier groupe sont appelées retenue "au fil de l'eau", les retenues du deuxième groupe sont appelées "retenues suspendues".

Problème des nappes de fissures: Les nappes de fissures sont souvent mal connues en raison du coût des dispositifs d'étude nécessaires. En règle générale, il ne faut parler de nappe de fissure que si on peut démontrer qu'il y a effectivement circulation d'eau dans la masse rocheuse. Dans ce cas, les gradients d'écoulement sont toujours faible (5 °/₀₀ en moyenne).

En se limitant, pour définir chaque site, aux 7 caractéristiques précédentes, on constate qu'il existe 7680 combinaisons possibles. Pour les 16 retenues étudiées le nombre moyen de caractères communs pour 2 retenues prises au hasard est de 2,18.

°₀°

MONOGRAPHS - LISTINGS - Tentative classification

SUMMARY

Dam type : Among the 16 dams described, there are 4 rockfill, 4 gravity and 8 arch dams. Arch dams have a double advantage for the study of reservoir watertightness, in that the extent of the exploratory work needed to investigate the abutments gives good information on karsts and the smaller foundation area makes supervision of the reservoir lake filling easier.

Morphology : Two classification criteria are used, (1) the nature of the areas submerged with reference to the karst system pattern, and (2) the thickness of rock cover over the underflows. In pratice, the first criterion also means finding whether or not the surface hydrographic systems are superimposed on old karstic ground. There also have to be morphological distinctions. The second criterion is easy to use.

Structure, tectonics : Any site can be classified using 4 structure types : synclinal structure, isoclinal structure, tabular structure and complex structure. This is independent of the degree of leakage risk.

Lithology : A distinction has to be made between limestone sites and dolomitic sites despite the practical difficulties involved, because of the specific characteristics of dolomite. Any formation can be classified using five facies types : massive pure limestones, bedded pure limestones, massive marlaceous limestones, well bedded marlaceous limestones and dolomites.

Fracturation : Classification is based on the intensity of the type of fracturation and the type of filling material.

Karstification : Defining karstification implies first distinguishing 4 characteristics : intensity, morphological type, degree of activity and the exposure of limestones to meteoric water. Reservoirs can be divided into 4 groups on the basis of these four characteristics :(1) major karstification, active karsts, (2) slight karstification, active karsts, (3) fossile karstification, and (4) moderate karstification.

Hydrology, hydrogeology : A basic distinction has to be made between two groups of reservoirs. Either the river on which the dam is built, is the surface collector for underground water from karst systems (1st group), or, if not, it feeds karst underflows (2nd group). Those in the first group are called "run-of-river" reservoirs and those in the second, "suspended" reservoirs.

Fracture aquifer problem : Often there is little information on fracture aquifers because of the high cost of the equipment needed to study them. As a general rule, we can only speak of flowing fracture aquifer il it can be shown that water effectively circulates in the rock mass, in which caæ, flow gradients are always low (5 °/oo on average).

Using these only 7 factors to define sites, 7680 different combinations are possible. For the 16 reservoirs described, the average number of features shared by any two taken at random is 2.18.

1 - LES OUVRAGES

Sur les 16 ouvrages présentés, 8 sont des barrages-voûtes, 4 des barrages-poids et 4 des barrages en enrochements.

Les barrages-voûtes sont pour la plupart des ouvrages de grande hauteur : 7 sur 8 dépassent 70 m et 3 d'entre eux atteignent ou dépassent 100 m (CASTILLON, CANELLES, VOUGLANS).

Cette constatation illustre le fait, bien connu, que dans les régions calcaires, les sites se prêtant à la construction des barrages de grande hauteur sont fréquents ; il s'agit, le plus souvent, de gorges étroites a priori favorables aux solutions "voûte". Il faut rappeler que le barrage de VAJONT, un des plus hauts barrages-voûtes du monde avec 262,50 m de hauteur, est édifié dans une gorge creusée dans des calcaires dolomitiques.

Dans le cadre de l'étude de l'étanchéité de la retenue, le barrage-voûte présente deux avantages :

1) *en raison des efforts qu'il transmet au terrain, le barrage-voûte nécessite une connaissance approfondie de l'appui rocheux. Dans ce but, des travaux de reconnaissance importants (galerie, sondages) sont généralement réalisés : ces reconnaissances facilitent la découverte et la connaissance du karst.*

2) *le barrage-voûte a une emprise minimale sur le terrain ; ainsi, la surveillance des fuites et leur localisation au rocher, à l'aval immédiat de l'ouvrage, sont-elles facilitées après la mise en eau.*

Les barrages en enrochements, au contraire, et dans une mesure moindre, les barrages-poids, ne présentent pas ces deux avantages. Les reconnaissances des appuis sont moins poussées en raison des efforts relativement faibles transmis par l'ouvrage au terrain ; par ailleurs, l'emprise de l'ouvrage est telle que des surfaces importantes de rocher sont masquées par les recharges aval. L'origine des eaux sortant des dispositifs de drainage ou au pied de la recharge aval est donc difficile à définir (griffon au rocher ?, non-étanchéité du noyau ou du masque ?). Par contre, en raison du relief généralement plus modéré des sites où sont construits ces barrages, les piézomètres sont plus faciles à installer et donc l'hydrogéologie souvent mieux connue.

2 - MORPHOLOGIES

Deux critères de classement peuvent être utilisés :

1) nature, par rapport au schéma du réseau karstique, des zones mouillées par les eaux de la retenue ;

2) épaisseur moyenne des terrains de couverture au-dessus des zones de circulations souterraines éventuelles.

• CLASSEMENT A PARTIR DU PREMIER CRITERE : Nature des zones mouillées

• Justification du choix du critère de classement

Le réseau karstique (chapitre 2 : 1ère partie), système naturel de drainage du massif calcaire, est constitué par :

- une zone d'absorption à points de pénétration multiples ;
- une zone de transfert où les conduits d'écoulement diminuent rapidement en nombre et assurent l'enfouissement des eaux ;
- une zone profonde à écoulement horizontal, zone dans laquelle les eaux transitent vers l'émergence.

Dans les cas les plus simples, il est possible de distinguer dans un paysage karstique les zones d'absorption et les zones de restitution. Mais, dans de nombreux cas, l'histoire du karst est en partie indépendante de l'actuel réseau hydrographique de surface.

Les systèmes karstiques présentent un certain décalage par rapport au réseau de surface. Le réseau hydrographique actuel peut être par exemple surimposé (selon le terme employé par les morphologues) dans un ancien paysage karstique. Dans ce cas, la rivière principale et, dans une certaine mesure, ses affluents, ont creusé leur vallée dans un massif calcaire où le drainage karstique était déjà organisé.

Les canyons, les clues, les défilés, illustrent bien ce phénomène de surimposition. Les parois des canyons présentent dans ces paysages une coupe naturelle dans la zone de transfert.

Dans l'emprise d'une retenue, il est donc possible de distinguer :

1) Les zones mouillées qui appartiennent à des zones d'absorption (dans ces zones, les points de pénétration possibles pour l'eau sont nombreux et répartis sur toute la surface).
2) Les zones mouillées qui appartiennent à la zone de transfert (dans ces zones les points de pénétration sont peu nombreux et localisés). Ces zones sont, répétons-le, le plus souvent des parois verticales.
3) Les zones de restitution : ces zones sont de faible étendue ; à la limite elles sont ponctuelles, c'est l'émergence.

Dans les canyons profonds creusés dans de grandes unités tabulaires, les retenues peuvent se développer sans que les eaux atteignent les zones d'absorption (ex : retenue du barrage de VOUGLANS). Dans d'autres cas, par contre, les retenues débordent sur la surface du plateau ; les eaux atteignent alors des zones d'absorption ; c'est le cas, en particulier, des retenues créées par un barrage situé dans une clue à pendage amont (1). Dans ce dernier cas, la retenue s'élargit vers

(1) *Une clue à pendage amont correspond au franchissement par une rivière d'une série calcaire plongeant vers l'amont. La gorge est de faible longueur et les formations non-calcaires situées à l'amont favorisent généralement l'élargissement de la vallée.*

l'amont et les eaux stockées recouvrent les zones d'absorption (ex : CANELLES), si ces dernières ne sont pas protégées par une formation étanche.

● Classement

A partir de ce critère, les retenues étudiées peuvent être réparties en 2 groupes :

- groupe 1 : barrages construits sur une rivière surimposée dans un paysage karstique antérieur ;
- groupe 2 : barrages construits sur une rivière non surimposée.

Dans le groupe 1, il faut distinguer 2 sous-groupes :

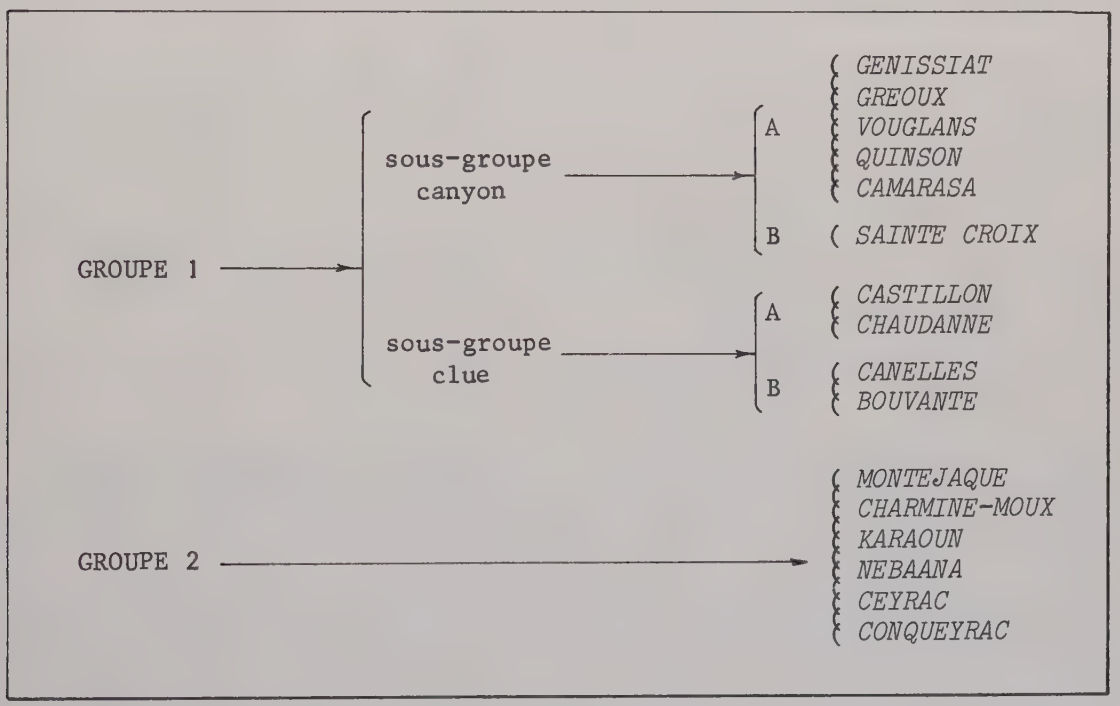
- le sous-groupe des canyons,
- le sous-groupe des clues.

A l'intérieur de chacun des sous-groupes, il faut distinguer les catégories A et B.

La catégorie A rassemble les retenues dont les eaux n'atteignent pas les zones d'absorption.

La catégorie B rassemble les retenues dont les eaux, au contraire, atteignent les zones d'absorption.

Dans un tel schéma, les retenues se classent de la façon suivante :



● Commentaires

Dans le groupe 1, la retenue du barrage de SAINTE CROIX apparaît comme un cas isolé ; en effet, le site de l'ouvrage correspond à une structure particulière : à l'amont immédiat du barrage, le plongement des couches (dues à la retombée brutale d'un anticlinal, pendage 45°) abaisse la surface des calcaires qui descend ainsi au-dessous de la cote de la retenue.

Le groupe 2 est un groupe homogène. Les eaux des retenues mouillent dans tous les cas des zones d'absorption.

Il faut noter que ce classement ne préjuge pas de la direction (amont ou aval par rapport au barrage) vers laquelle les zones d'absorption évacuent les eaux.

● CLASSEMENT A PARTIR DU DEUXIEME CRITERE : Epaisseur des terrains de couverture situés au-dessus des zones de circulations souterraines éventuelles.

Cette épaisseur correspond à la distance entre la cote de la retenue et l'altitude moyenne de la zone suspecte considérée.

● Justification et choix du critère

Rappelons (voir 1ère partie : chapitre 2) que la nature, la fréquence et la morphologie des vides karstiques ne sont pas indépendantes de la distance de la cavité au versant d'air.

Dans les formations sédimentaires (qu'elles soient calcaires ou non), on peut estimer (d'après les essais d'eau notamment) que, sur une vingtaine de mètres de profondeur (1), la fissuration naturelle, élargie par la décompression et éventuellement par la dissolution, crée une zone perméable dans les 3 dimensions.

Au-dessous, dans les régions calcaires karstiques, malgré une concentration rapide des conduits de transfert de l'eau, les phénomènes "de surface" peuvent affecter une épaisseur voisine de 100 m (la pénétration des racines jusqu'à ces profondeurs illustre ces phénomènes).

Enfin, les réseaux karstiques les plus profonds atteints par les spéléologues sont à -580 m par rapport au versant d'air.

Par conséquent, la probabilité et le type de cheminement peuvent être associés à l'épaisseur de la couverture naturelle au-dessus de la cote du plan d'eau de la retenue dans la zone suspecte.

Pour réaliser un classement on peut proposer les coupures suivantes : (0 - 25 m), (25 - 100 m), (100 - 600 m), (+ de 600 m), en considérant que :

(1) *Sauf à proximité de certains versants de grande hauteur et dans des zones particulièrement tectonisées, où la décompression peut affecter une plus grande épaisseur.*

a) pour les couvertures inférieures à 25 m, le risque de fuite existe même en présence d'une karstification faible ;

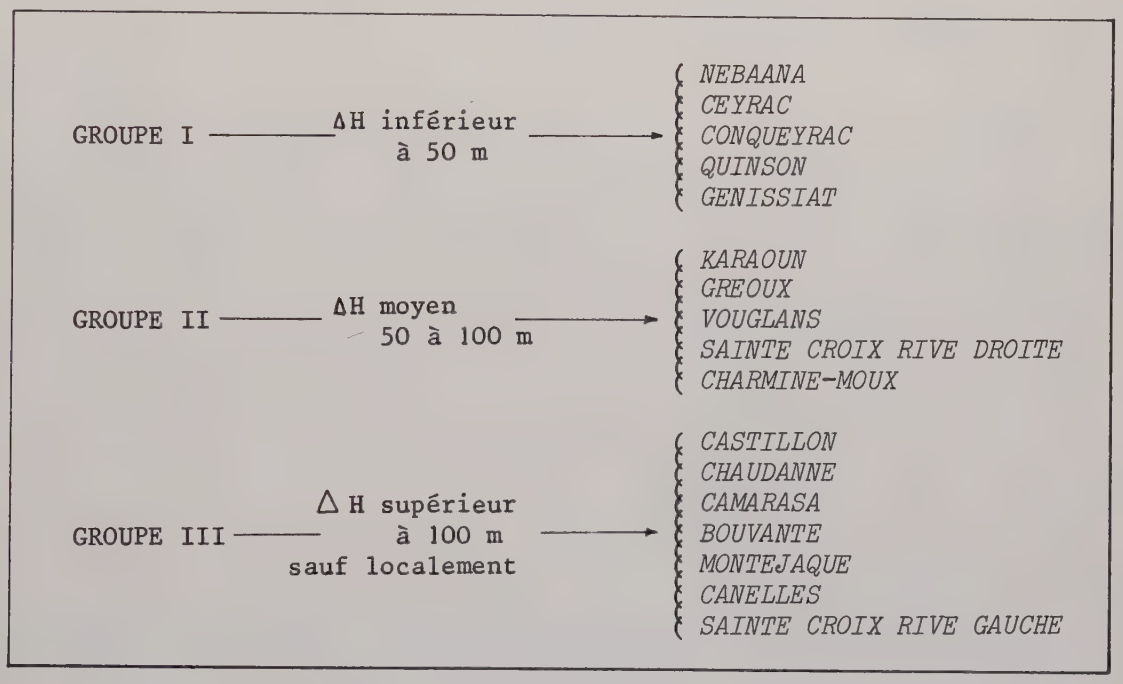
b) de 25 à 100 m, le terrain peut être affecté dans la masse (suivant une trame assez lâche cependant) par la karstification, à condition que cette dernière soit moyennement développée ;

c) au-delà de 100 m, sauf localement et jusqu'à 600 m, la possibilité d'une karstification générale apparaît faible mais l'existence possible de conduit pénétrable ne peut être niée ;

d) au-delà de 600 m de couverture, on entre dans le domaine des cas sortant de la règle générale. Chaque cas doit être étudié en particulier, en tenant compte notamment de la structure géologique et de la position du niveau de base.

● Classement

A partir de ces divisions, appliquées pour chaque retenue aux zones les plus suspectes, on obtient le classement suivant :



Dans les aménagements du NEBAANA, de CEYRAC et de CONQUEYRAC, la forme des retenues (voir 2ème partie) montre que les possibilités morphologiques ont été utilisées au maximum par le projeteur.

Pour le groupe III (Δ H supérieur à 100 m), il est évident qu'à proximité immédiate des appuis, Δ H est le plus souvent inférieur à 100 m.

3 - STRUCTURE - TECTONIQUE

● Rôle de la structure géologique et des failles

Rappel : Le rôle de la structure dans l'étanchéité d'une retenue est multiple (voir 1ère partie : chapitre 6, paragraphe 3) :

a) dans les séries où s'intercalent entre les séquences calcaires des horizons imperméables d'épaisseur suffisante, ceux-ci peuvent constituer un horizon étanche (ex : synclinal perché) ;

b) en créant de grandes unités géologiques, la structure favorise la formation de grands réseaux karstiques qui bénéficient d'un phénomène d'échelle ;

c) dans les zones où la structure est complexe, la fracturation est généralement dense et favorise le drainage karstique (1) ;

d) dans les unités tabulaires, le réseau hydrographique s'établit indépendamment de la structure.

En bref, d'une manière générale, le rôle de la structure ne pourra être défini qu'associé à un deuxième caractère.

● Classement

Il est cependant possible de classer les retenues étudiées en 4 groupes, en fonction de la structure générale de l'unité dans laquelle elles s'inscrivent. Mais ce classement n'implique pas un risque de fuites plus ou moins grand selon les catégories.

- Groupe 1 : structure synclinale "en gouttière". La retenue se développe suivant l'axe du synclinal.
- Groupe 2 : structure isoclinale transverse à la vallée. Le barrage ferme un défilé (clue ou canyon) creusé dans une unité recoupée en travers-bancs par la rivière.
- Groupe 3 : structure tabulaire. Le barrage est situé sur une rivière recoupant une unité à faible pendage.
- Groupe 4 : structure complexe.

Dans ce classement, les retenues se répartissent comme suit :

(1) *Bien que les structures complexes soient le plus souvent peu propices à l'établissement de réseaux importants. Il y a donc là deux facteurs qui se contrarient.*

- groupe 1 : *GENISSIAT* (synclinal à fond plat)
  CHARMINE-MOUX
  VOUGLANS (synclinal à fond plat)
- groupe 2 : *CASTILLON*
  CANELLES
  SAINTE CROIX (1)
  BOUVANTE
- groupe 3 : *CAMARASA*
  GREOUX
  CEYRAC
  CONQUEYRAC
  QUINSON
- groupe 4 : *CHAUDANNE* (anticlinal complexe)
  KARAOUN (fossé tectonique)
  NEBAANA (anticlinal complexe)
  MONTEJAQUE (poljé)

4 - LITHOLOGIE, PETROGRAPHIE, STRATIGRAPHIE

● Problème des dolomies

Le barrage de CAMARASA est le seul, parmi les aménagements décrits dans la 2ème partie, qui soit situé en totalité sur des dolomies franches. Des formations dolomitiques sont également présentes sur le site de VOUGLANS où des niveaux interstratifiés de dolomies séparent les séquences calcaires et où, en profondeur, au-dessous du niveau de la rivière, dans l'emprise du voile, les dolomies deviennent prépondérantes. A KARAOUN également, en rive droite, des dolomies sableuses constituent une partie de la cuvette.

Dans ces deux derniers cas cependant, les calcaires restentla formation principale.

Formations typiquement karstiques comme les calcaires, les dolomies constituent néanmoins une famille de roches très individualisées qui se différencient nettement des calcaires par leur génèse d'une part, mais également par leurs propriétés mécaniques (2) et chimiques et par le type de leur évolution karstique.

(1) *L'unité recoupée par le VERDON à la hauteur du site du barrage de SAINTE CROIX est en fait un anticlinal dissymétrique. Le barrage est situé sur l'axe de l'anticlinal ; le pendage des couches vers l'amont et l'aval est faible (quelques degrés) à proximité immédiate du site.*

(2) *Les essais comparatifs sur les comportements mécanique et thermique des calcaires et des dolomies (Pérami 1971) ont montré que soumis aux mêmes contraintes, les calcaires se déforment plastiquement sans accroissement de perméabilité, tandis que les dolomies sont transformées en sable poreux.*

La dolomie est, en effet, une roche réservoir pour l'eau (ou les hydrocarbures) ; elle présente par sa nature même une véritable porosité (1). Ce caractère la différencie fondamentalement des calcaires qui, sauf dans des zones tectonisées ou karstifiées en grand (et dans certaines conditions seulement), n'ont jamais une capacité de stockage aussi élevée.

La logique voudrait donc que l'on considère les barrages en terrain dolomitique comme un sous-groupe bien particulier des ouvrages en pays karstique.

Dans la réalité, le problème est plus complexe.

Dans un massif rocheux, il est possible de rencontrer au niveau de l'échantillon, toutes les compositions minéralogiques intermédiaires entre la dolomite pure et la calcite pure. Dans une série lithologique, les séquences de dolomies et de calcaire peuvent alterner. Enfin, le phénomène de dolomitisation qui se développe dans une roche primitivement calcaire et qui est un phénomène secondaire (2), peut présenter dans un volume rocheux donné un front sinueux qui pose un problème de frontière, insoluble dans la pratique.

- Stratigraphie

Toutes les retenues étudiées intéressent des formations d'âge jurassique supérieur ou crétacé. La majeure partie d'entre elles est située dans les Alpes françaises. Les formations géologiques affleurant dans les retenues étudiées ont donc un âge absolu relativement voisin et surtout ont subi dans la plupart des cas des événements tectoniques comparables.

Cette homogénéité stratigraphique et tectonique limite la généralité des conclusions qui peuvent être tirées de ces exemples. Rappelons qu'il existe des formations calcaires d'âge primaire qui ont subi une longue histoire tectonique et dans lesquelles la karstification a des aspects originaux (paléokarsts, métamorphisme, minéralisation).

- Lithologie, faciès (voir 1ère partie : chapitre 6, paragraphe 2 "Rôle de la lithologie")

L'épaisseur des bancs, la fréquence et la nature des joints jouent un rôle dans l'importance et le type du karst. Ces caractères sont liés aux conditions de sédimentation de la roche. La continuité et l'extension de la série sont souvent en partie inscrites dans le faciès.

En pratique, il est possible de classer les retenues en 4 groupes, à partir des distinctions pétrographiques et lithologiques suivantes :

(1) *12 % par exemple pour certaines dolomies.*

(2) *Les dolomies primaires sont considérées aujourd'hui comme des curiosités minéralogiques.*

- Groupe 1 : calcaires massifs, très purs, cristallisés, souvent récifaux. Ex : SAINTE CROIX (partie basse).
- Groupe 2 : calcaires purs, à pâte assez fine (tendance lithographique), stratifiés en bancs bien individualisés, joints soulignés ou non par des passées marneuses. Ex : QUINSON.
- Groupe 3 : calcaires légèrement marneux, à pâte très fine, stratifiés en bancs non séparés par des joints marneux. Ex : GREOUX (série grise), CHARMINE-MOUX.
- Groupe 4 : calcaires marneux stratifiés en bancs de 2 à 3 dm, séparés par des couches de marnes ou de marno-calcaires d'épaisseur inférieure ou égale. Ex : GREOUX, série jaune.

● Classement

Ces distinctions permettent le classement suivant :

- groupe 1 : *BOUVANTE*
  GENISSIAT
  SAINTE CROIX (partie basse)
- groupe 2 : *QUINSON*
  SAINTE CROIX (partie haute)
  CANELLES
  CASTILLON
  NEBAANA (calcaire campanien)
  CEYRAC
  CONQUEYRAC
- groupe 3 : *GREOUX* (en partie)
  CHARMINE-MOUX
- groupe 4 : *NEBAANA* (en partie)
  GREOUX (en partie)

5 - FRACTURATION

● Type de la fracturation (voir 1ère partie : chapitre 6)

Le type de fracturation reflète souvent la pétrographie et la lithologie des roches ; réciproquement, le faciès de la roche permet de prévoir le type de fracturation dans les zones où l'observation directe est réduite.

Par exemple, les calcaires à pâte fine, légèrement marneux et bien stratifiés, sont généralement découpés par des réseaux de diaclases très régulières.

● Intensité

Contrairement au type de fractures, l'intensité de la fracturation et le remplissage des cassures sont en grande partie indépendants du faciès pétrographique de la roche (il ne s'agit pas ici des remplissages karstiques dans des fissures élargies).

Par exemple dans les calcaires marneux du Crétacé du site de GREOUX, les diaclases sont vides.

A quelques dizaines de km au Nord (à CASTILLON), dans les mêmes faciès, les diaclases sont injectées de calcite et constituent de véritables systèmes de cloisons (photo 3, 2ème partie, chapitre 8).

Quant à l'intensité de la fracturation, elle peut être associée en partie à la structure, mais seule la connaissance de la cinématique de l'histoire tectonique et géologique de la région permettrait de l'expliquer en totalité.

● Classement

En pratique, à partir des 3 critères (régularité, remplissage, intensité) on obtient le classement suivant :

(intensité : I = intense ; M = moyenne ; F = faible)

Fracturation nette et régulière →	sans remplissage	*CASTILLON*		M	
		VOUGLANS			F
		CEYRAC		M	
		CONQUEYRAC		M	
		GREOUX		M	
		QUINSON		M	
		CAMARASA		M	
		GENISSIAT			F
		CHARMINE-MOUX			F
	avec calcite	*NEBAANA*	I		
		CHAUDANNE (cuvette)	I		
Fracturation diffuse et anarchique →	sans remplissage	*SAINTE CROIX*	I		
		BOUVANTE	I		
		KARAOUN		M	
	avec calcite	*CHAUDANNE* (barrage)	I		

6 - LA KARSTIFICATION

Tout en étant le point commun de toutes les retenues étudiées, le karst présente d'un site à l'autre des différences profondes qui confèrent à chaque site un caractère spécifique (1).

- Les critères de classification

Pour obtenir un classement, il est indispensable d'ordonner les observations par rapport à 4 critères principaux :

- l'intensité (1ère partie : chapitre 1),
- le type morphologique (1ère partie : chapitre 4),
- l'activité actuelle du karst et le colmatage (1ère partie : chapitres 3 et 5),
- l'exposition aux eaux météoriques des calcaires des massifs du secteur de la retenue (1ère partie : chapitre 5).

L'intensité de la karstification pourrait être définie d'une manière quantitative si l'on était capable de mesurer le volume total des vides karstiques dans chaque volume élémentaire. Pratiquement, on constate que parmi les sites étudiés, certains sont caractérisés par la présence d'indices karstiques exceptionnels.

Pour les 4 retenues de MONTEJAQUE, CANELLES, VOUGLANS, SAINTE CROIX, des réseaux karstiques de grande taille existent à l'aval immédiat du barrage.

A MONTEJAQUE, la CUEVA DEL GATO : 3850 m
A CANELLES, la CUEVA de la rive gauche : 800 m
A VOUGLANS, la CABORNE DE MENOUILLE : 5000 m
A SAINTE CROIX, la grotte de l'EGLISE : 2100 m

En reprenant les chiffres donnés chapitre 1, 1ère partie, on constate que dans le Jura français, sur 850 grottes, 10 seulement ont plus de 500 m de développement. Dans les 4 cas cités, on est donc en présence d'une karstification locale exceptionnelle.

Inversement, pour les retenues du NEBAANA et de KARAOUN (2), aucun indice karstique pénétrable notable n'a été décelé.

(1) *On remarque que dans les publications sur les ouvrages en pays calcaire, l'adjectif "karstique" est systématiquement ajouté à "calcaire" dès qu'apparaissent les premières fissures argileuses.*

(2) *En particulier à proximité de la retenue, exception faite de quelques petites poches à l'aval immédiat du site du barrage.*

- Le type morphologique

Les deux principaux types morphologiques (karsts de fissures et karsts de joints) ont été définis dans la première partie. Ils constituent un critère de classement facile et significatif. Il faut cependant préciser, dans certains cas, la présence de grandes cavités groupées sous le nom de "Salle".

- Karst actif, karst fossile

Rappel : Les karsts actifs sont les karsts qui jouent actuellement leur rôle de drainage souterrain dans le massif calcaire. Les exemples les plus nets sont généralement fournis par les karsts de haute montagne.

Les karsts fossiles sont des systèmes qui n'assurent plus de drainage du massif. Ils peuvent être vides ou colmatés. Un karst vide (partiellement ou en totalité) ne peut être fossile que s'il est protégé des eaux de précipitation par une couverture étanche (1). Si le karst est colmaté, le massif calcaire peut être découvert en surface. Mais, c'est un état transitoire car les infiltrations organisent de nouveaux réseaux et déblaient en partie les réseaux colmatés.

L'étude des cas réels montre que, dans un volume calcaire, peuvent coexister différents réseaux plus ou moins indépendants, d'âges divers, fonctionnels ou non.

Les karsts fonctionnels ou non peuvent être remblayés en partie ou en totalité :

- soit par leurs propres apports (argile de décalcification et de décantation, concrétions) ; il y a alors auto-colmatage ;
- soit par des apports extérieurs (recouvrement d'une série karstifiée par une nouvelle formation géologique qui colmate le karst ; dépôts d'alluvions, moraines, etc.).

Cette distinction, auto-colmatage - apports extérieurs, est fondamentale.

Remarque : Le paléokarst est le témoin d'une karstification ancienne qui s'est développée dans un paysage différent du paysage actuel ; ces karsts anciens ne peuvent être mis en évidence avec certitude que par l'étude des remplissages.

Bien souvent, les réseaux actifs actuels ont, semble-t-il, en partie emprunté des conduits à d'anciens réseaux. Bien qu'il soit important, au niveau des études, de rechercher l'existence de paléokarsts, cette coupure n'est pas utilisée dans le tableau (fig. 2) parce qu'il s'agit d'un critère à lui seul insuffisant pour juger de l'étanchéité d'un massif.

(1) *Dans un massif sans couverture étanche, on peut toujours identifier des cavités vides et fossiles. Ex : grotte de l'EGLISE à l'aval du site de SAINTE CROIX. Mais on doit considérer le système de drainage du massif dans son ensemble.*

● Classement

A partir de ces différents critères, il est possible d'établir le tableau fig. 2.

En fonction de ce tableau, on peut constituer les groupes suivants :

GROUPE 1 : karstification forte et karst actif
- *MONTEJAQUE*
- *CANELLES*
- *VOUGLANS*
- *CEYRAC*
- *CONQUEYRAC*
- *SAINTE CROIX*

GROUPE 2 : karstification faible et karst actif
- *CHAUDANNE*
- *NEBAANA*
- *KARAOUN* ? (en partie fossile)

GROUPE 3 : karst fossile
- *GENISSIAT*
- *GREOUX*

GROUPE 4 : karstification moyenne
- *CAMARASA*
- *BOUVANTE*
- *CHARMINE-MOUX*
- *CASTILLON*
- *QUINSON*

Les groupes 1 et 3 sont homogènes et typiques. Les groupes 2 et 4 sont hétérogènes ; les retenues présentent souvent un caractère spécifique qui les différencie nettement des autres retenues du même groupe.

7 - HYDROLOGIE, HYDROGEOLOGIE

● Choix du critère de classement (voir 1ère partie : chapitres 2 et 3)

Les retenues peuvent se répartir en 2 groupes à partir du caractère hydrogéologique suivant : position du niveau de base des écoulements karstiques par rapport à la rivière sur laquelle est construit l'ouvrage.

L'importance de ce critère est à rappeler : quand une rivière traverse une région karstique, deux cas sont en effet possibles :

FIG 2

Barrages	intensité de la karstification	exposition des surfaces calc. du B.V. topographique	type morphologique du karst	activité du karst	importance et origine du colmatage	Remarques
CAMARASA	moyenne	exposées	fissures et poches	actif	A.C. partiel	karst dolomitique
BOUVANTE	moyenne	exposées	fissures	actif	A.C. partiel	débourrage
MONTEJAQUE	forte	exposées	fissures et conduits	actif	A.C. faible	
GENISSIAT	faible	protégées à 95 %	poches	fossile	A.E. total	
CHARMINE-MOUX	moyenne	exposées	fissures et conduits	actif	A.C. partiel A.E. ?	tapis de moraine non étanche
CASTILLON	moyenne-faible	exposées	fissures	actif	A.C. faible	
CHAUDANNE	faible	exposées	fissures	actif	A.C. ?	karstification faible
CANELLES	forte	exposées	fissures et salles	actif	A.C. faible	karst spectaculaire
KARAOUN	moyenne-faible	exposées en partie	fissures	actif	A.C. partiel + A.E. ?	tapis d'alluvions étanchéité douteuse
NEBAANA	faible	exposées en partie	fissures	actif	A.C. partiel	karst mal connu
GREOUX	forte (mais fossile)	protégées à 90 %	fissures et conduits	fossile	A.C. prédominant	paléokarst
VOUGLANS	forte	exposées	conduits	actif	A.C. partiel	colmatage de moraine en partie disparu
CEYRAC CONQUEYRAC	forte	exposées	fissures	actif	A.C. faible	
QUINSON	moyenne-forte	protégées à 40 %	fissures	en partie fossile	A.C. + A.E.	traces d'ancien colmatage
SAINTE CROIX	forte	exposées à 80 %	conduits	actif et fossile	A.C. et A.E.	paléokarst

A.C. : auto-colmatage
A.E. : apports externes

Fig. 2 : Principaux caractères de la karstification, pour chacune des retenues étudiées.

1er cas : Sur la longueur du cours de la rivière où se développera la retenue, la rivière constitue le drain de surface où aboutissent les eaux infiltrées dans les massifs formant les rives. A l'étiage, la surface de la nappe de fissures peut descendre jusqu'à la cote de la rivière (1).

2ème cas : Le drainage des massifs se fait vers des exutoires situés sur la rivière, mais à l'aval du tronçon considéré, ou vers des exutoires situés à des cotes plus basses dans d'autres vallées.

Dans ce deuxième cas, en période d'étiage notamment, les eaux de la rivière peuvent s'infiltrer en totalité ou en partie et participer à l'alimentation des réseaux karstiques. A l'étiage, la nappe est plus basse que la cote de la rivière.

Cette coupure est fondamentale car elle précise pour une retenue donnée la nature du risque de fuites qu'il faut envisager.

Dans le premier cas, les fuites ne peuvent correspondre qu'à des circulations sensiblement horizontales à travers les versants et, en général, les eaux infiltrées dans les versants de cuvette réapparaissent dans la vallée à l'aval du barrage. Il s'établit dans la rive perméable, une véritable nappe de fissures.

Dans le deuxième cas, les fuites peuvent correspondre à des infiltrations gravitaires descendantes, rejoignant la nappe profonde avec risques de débourrage dans le fond de la cuvette.

- Classement

En fonction de ce critère, les retenues se répartissent comme suit :

1er groupe : la rivière joue le rôle de drain
- *CAMARASA*
- *GENISSIAT*
- *CASTILLON*
- *CHAUDANNE*
- *CANELLES*
- *NEBAANA*
- *GREOUX*
- *VOUGLANS*
- *QUINSON*
- *SAINTE CROIX*

2ème groupe : la rivière alimente la nappe
- *BOUVANTE*
- *MONTEJAQUE*
- *CHARMINE-MOUX*
- *KARAOUN*
- *CEYRAC*
- *CONQUEYRAC*

(1) *A l'étiage, la pente de la nappe est voisine de 2 à 3 ‰ - VERDON rive gauche, site de SAINTE CROIX.*

Pour les retenues du 1er groupe, nous emploierons dans la suite du texte le terme de retenue "au fil de l'eau"; pour les retenues du 2ème groupe, le terme de "retenue suspendue".

- Problème des nappes de fissures

On possède, dans l'ensemble, peu de renseignements sur le mouvement de l'eau dans le terrain en raison du coût et des difficultés de l'observation (réalisation et exploitation du dispositif).

Sur les 16 retenues étudiées, le contexte hydrogéologique est assez bien précisé pour 5 d'entre elles (SAINTE CROIX, CEYRAC, CONQUEYRAC, KARAOUN et BOUVANTE (1)).

Dans un seul cas, SAINTE CROIX, la nappe a fait l'objet d'une observation permanente par des appareillages à enregistrement continu.

Pour cette nappe, qui est la mieux connue, sur 30 piézomètres réalisés (sur une surface de 2,5 km2), une quinzaine seulement ont un comportement qui s'intègre à un ensemble. Les autres forages se sont révélés étanches ou présentent des fluctuations importantes avec une redescente très lente du niveau de l'eau après les pluies. Dans ce massif qui est caractéristique des massifs calcaires karstiques, on vérifie que le système de fissures constituant "le support" de la nappe est un réseau extrêmement lâche.

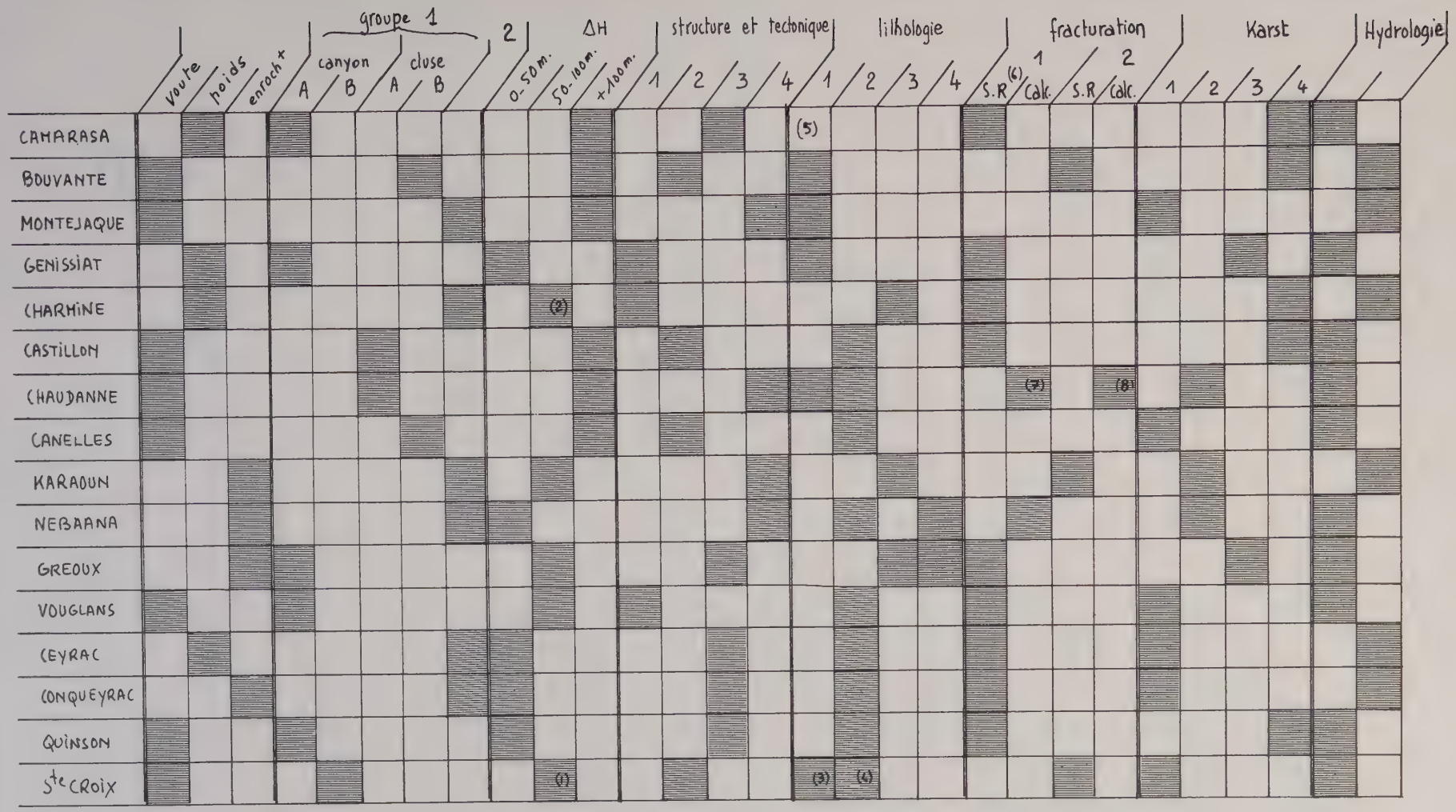
Le déplacement de l'eau est cependant une réalité contrôlée, mesurée par des colorations à la fluorescéine et au bichromate. Le gradient d'écoulement est voisin de 5 ‰ (2,5 ‰ à l'étiage) (2).

Chaque fois que l'on peut étudier une nappe de fissures en terrain karstique, les gradients mesurés sont toujours faibles ; cette observation pose le problème des "nappes" à forte pente.

Pour résoudre cette contradiction, il paraît souhaitable de prendre la précaution suivante : il ne faut parler de gradient pour les nappes de fissures que lorsqu'il y a effectivement écoulement de l'eau dans la masse rocheuse, cet écoulement doit être vérifié par marquage des eaux (coloration) ; cette condition étant respectée, ce gradient peut être, dans certaines limites, assimilé à une perte de charge liée au mouvement.

(1) *En raison de travaux récents entrepris sur cet aménagement déjà ancien.*

(2) *Rappel : Chaque fois que l'on a la possibilité de mesurer la pente moyenne des écoulements karstiques en zone de plateau, on obtient des valeurs inférieures à 10 ‰.*



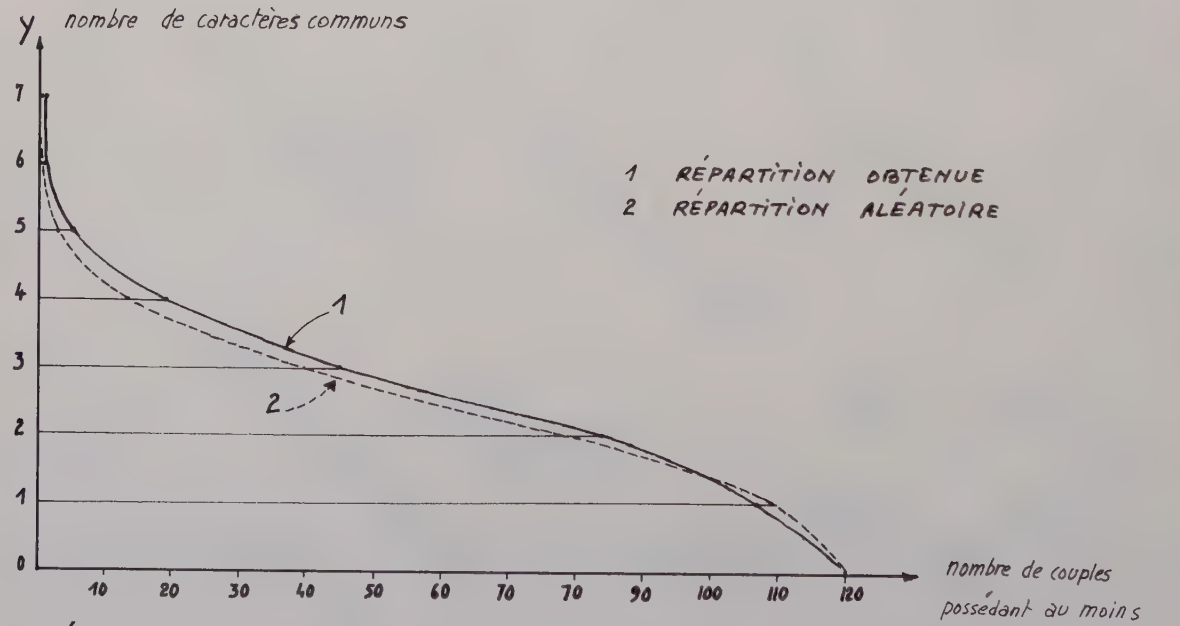
(1) Rive droite
(2) Rive gauche
(3) partie basse
(4) partie haute
(5) dolomie
(6) S.R = sans remplissage
Calc. = remplissage de calcite
(7) cuvette
(8) barrage.

FIG 3

FIG 4

	CAMARASA	BOUVANTE	MONTEJAQUE	GÉNISSIAT	CHARMINE	CASTILLON	CHAUDANNE	CANELLES	KARAOUN	NEBAANA	GRÉOUX	VOUGLANS	CEYRAC	CONQUEYRAC	QUINSON	Ste CROIX
CAMARASA																
BOUVANTE	2															
MONTEJAQUE	1	3														
GENISSIAT	3	1	1													
CHARMINE	2	2	2	1												
CASTILLON	4	3	1	2	1											
CHAUDANNE	2	2	3	2	0	4										
CANELLES	2	3	1	1	0	4	3									
KARAOUN	0	2	3	0	4	0	2	0								
NEBAANA	1	0	2	2	1	2	5	3	3							
GRÉOUX	4	0	0	4	3	1	1	1	2	2						
VOUGLANS	3	0	0	4	3	3	2	3	1	2	4					
CEYRAC	1	1	3	2	3	2	1	2	2	3	2	3				
CONQUEYRAC	2	1	3	2	3	2	1	2	2	3	2	3	7			
QUINSON	5	1	0	4	2	4	2	2	0	3	4	5	4	4		
Ste CROIX	1	3	1	2	1	3	3	4	2	2	2	5	2	2	2	

nombre de caractères communs	distribution obtenue nbre combinaison	%	cumulé	distribution aléatoire nbre combinaison	%	cumulé
0	13	10,8	120	10	8,4	120
1	23	19,2	107	31	26,0	110
2	39	32,5	84	39	32,7	79
3	26	21,7	45	27	22,0	40
4	14	11,7	19	10	8,6	13
5	4	3,3	5	3	2,1	3
6	0	0	1	0	0,25	0
7	1	0,8	1	0	0,01	0
totaux →	120	100		120	100	



RÉPARTITION DES COUPLES EN FONCTION DU NOMBRE DE CARACTÈRES COMMUNS — COURBE CUMULÉE —

La confusion qui existe est due au fait que, dans bien des cas, on emploie le terme de nappe de versant en ajoutant "qui remonte rapidement" et que l'on dessine des nappes en courbes de niveau en se basant sur les cotes des niveaux d'eau mesurées dans des piézomètres sans vérifier s'il y a effectivement écoulement dans la masse rocheuse (1).

S'il n'y a pas mouvement, le niveau de l'eau mesuré en sondage correspond le plus souvent à la limite plus ou moins nette qui sépare les terrains fissurés rapidement drainés après la pluie, d'une zone profonde non drainante où se piège l'eau.

Dans un tel massif, pendant une courte période après une pluie, l'eau qui s'infiltre s'écoule au contact de ces deux zones avec une pente qui n'est pas due à une perte de charge. Il n'y a pas mouvement de l'eau dans la masse non drainée sous-jacente. L'eau a un comportement voisin de celui des eaux de ruissellement en surface sur un massif étanche.

En pratique, dans le cadre des études de l'étanchéité d'une retenue, la confusion entre nappe de fissure et nappe de versant n'est pas très dangereuse car elle ne conduit pas à sous-évaluer les risques.

8 - BILAN GENERAL

Le tableau (fig. 3) regroupe l'ensemble des classifications effectuées à partir de chaque caractéristique du cadre naturel.

Si on ne tient pas compte du type de l'ouvrage construit, chaque site apparaît défini par 7 caractéristiques. Pour chaque caractéristique, on classe l'ouvrage dans un groupe choisi parmi 2, 3, 4 ou 5 groupes selon la caractéristique.

Il existe au total 7680 combinaisons possibles. Ce chiffre montre, malgré l'effort de simplification, la diversité des contextes géologiques des retenues.

(1) *Le seul test d'ailleurs qui prouve l'existence d'une nappe de fissures est l'efficacité drainante d'un pompage ou d'une galerie qui, traversant la "nappe", provoque un rabattement.*

Malgré cette diversité, il est évident que les retenues ont parfois des caractères communs. C'est pourquoi, chaque retenue étudiée a été comparée successivement à toutes les autres ; pour chaque combinaison, on a noté le nombre de caractères communs aux deux retenues ainsi rapprochées. On obtient 120 combinaisons (16 retenues prises successivement 2 à 2).

Le tableau 4a indique le nombre de caractères communs de chacune de ces combinaisons (1). On constate qu'il n'existe qu'un cas où deux retenues possèdent en commun les 7 caractéristiques : ce sont les retenues de CEYRAC et CONQUEYRAC. La moitié des combinaisons ont moins de 3 caractères communs. Le nombre moyen de caractères communs à 2 retenues est de 2,18.

La courbe 4b donne la répartition cumulée des couples de barrages, en fonction du nombre de caractéristiques communes. On a fait figurer sur le même graphique la courbe que l'on obtiendrait si la distribution des 7 caractéristiques était aléatoire pour les 120 combinaisons possibles. Dans ce cas, le nombre de caractères communs ne serait que de 2,04.

Sans vouloir tirer des règles strictes de l'analyse statistique d'un aussi faible nombre de données, on peut faire les remarques suivantes :

Les retenues étudiées ont des caractéristiques légèrement plus homogènes que si la répartition se faisait au hasard (tableau 4c).

On peut surtout rechercher si des différences peuvent être constatées entre les retenues étanches et les retenues non-étanches (voir liste chapitres 2 et 3). Si on compare 2 à 2 les 5 retenues étanches, on constate que le nombre moyen de caractères communs est de 2,6. Dans le cas des 10 retenues non-étanches, il est de 1,98. Il semble donc (malgré le faible nombre des combinaisons étudiées dans le cas des retenues étanches) qu'il existe une certaine homogénéité dans les caractères des retenues étanches.

Par contre, les retenues non-étanches se ressemblent moins ; c'est-à-dire que ce n'est pas toujours la même série de caractères qui, associés, provoquent l'apparition de fuites.

°
° °

(1) *Il faut noter que ce calcul attribue la même importance à chacune des caractéristiques ; ce qui, nous l'avons vu, est en partie inexact.*

CHAPITRES

2.3

Mises en eau. bilans.

RETENUES ETANCHES - RETENUES NON-ETANCHES

PLAN

CHAPITRE 2 :
- Introduction
- Caractères communs et différence
- Commentaires

CHAPITRE 3 :
- Introduction

1 - Caractéristiques des fuites

2 - Bilans

°
° °

La mise en eau considérée comme un test permet de classer les retenues en deux groupes :

1) groupe des retenues étanches,
2) groupe des retenues non-étanches.

Sur les 16 retenues étudiées, 14 (15 *) ont été mises en eau ; 9 (10 *) ont présenté des fuites d'importance très variable ; 5 se sont révélées réellement étanches.

* Si on compte la "mini-mise en eau" de SAINTE CROIX comme une mise en eau, on obtient 15 retenues mises en eau au lieu de 14 ; le test de cette mise en eau donne alors 10 au lieu de 9 pour le groupe retenues non-étanches.

°
° °

Les retenues étanches feront l'objet du chapitre 2.

Les retenues non-étanches feront l'objet du chapitre 3.

LES RETENUES ETANCHES

RESUME

Ce sont les retenues des barrages de GENISSIAT, CHAUDANNE, GREOUX, CEYRAC et QUINSON.

Ces retenues présentent des caractères communs très nets. Tous les ouvrages sont construits sur des rivières pérennes constituant le niveau de base des écoulements souterrains (sauf CEYRAC). Ces rivières ont des pentes d'écoulement faibles, 5 à 10 °/₀₀. Avant le remplissage, aucune source pérenne ou temporaire à cycle annuel n'existait à l'aval des ouvrages à moins de 2 km.

La karstification des massifs calcaires est pour certaines retenues très marquée; mais en général le karst est colmaté et fossile (GREOUX, GENISSIAT). Les massifs calcaires, sauf dans le cas de CEYRAC et La CHAUDANNE, sont protégés par une couverture de dépôts étanches. La retenue de CEYRAC apparaît comme un cas particulier.

Le bilan des études de ces retenues attire l'attention sur l'importance des colmatages et des tapis étanches protégeant les massifs.

WATERTIGHT RESERVOIRS

SUMMARY

GENISSIAT, CHAUDANNE, GREOUX, CEYRAC and QUINSON reservoirs are watertight.

They all share some very clear identical features. All except CEYRAC lie on perennial rivers that form the base level for the underground flow. All the river slopes are shallow, between 5 and 10 °/₀₀. There are no perennial or temporary springs with an annual cycle less than 2 km downstream of the dams before impounding.

For some, karstification of the limestones is very marked, but in general the karsts are blocked and fossile (GREOUX, GENISSIAT). Except for CEYRAC and CHAUDANNE, the limestones are protected under a mantle of impervious deposits. CEYRAC reservoir is a special case.

It is clear from the listings for these reservoirs how important plugging and existence of impervious mantles protecting the rock are.

CHAPITRE

2

Les retenues étanches

● Introduction

Les retenues qui se sont révélées étanches au remplissage sont celles des barrages de :

- GENISSIAT : hauteur 104 m
- CHAUDANNE : hauteur 74 m
- GREOUX : hauteur 64 m
- CEYRAC : hauteur 20 m
- QUINSON : hauteur 15 m

On remarque immédiatement que CEYRAC et QUINSON sont deux ouvrages de faible hauteur comparativement aux trois autres.

Ces deux ouvrages présentent de plus la particularité de n'avoir ni l'un ni l'autre de voile d'étanchéité.

L'étanchéité de la retenue du barrage de CEYRAC doit cependant faire l'objet de certaines réserves (1).

Par les caractères de son contexte géologique, l'étanchéité de la retenue de QUINSON ne paraît pas devoir être mise en doute, le risque de fuite à grande distance étant exclu. On peut cependant penser que la source située à l'aval immédiat de l'ouvrage en rive droite est en partie alimentée par les eaux de la retenue. En admettant cette hypothèse, les débits de la source (voisins de quelques litres/seconde) seraient encore insuffisants pour que l'on puisse ranger la retenue de QUINSON dans le groupe des retenues non-étanches.

CARACTERES COMMUNS ET DIFFERENCE

● Caractères communs

L'examen du tableau récapitulatif et les classements effectués (chapitre 1) mettent en évidence les points communs suivants :

- Tous les barrages (sauf CEYRAC) sont sur des rivières pérennes qui constituent dans la zone de la retenue le niveau de base des écoulements souterrains.

- Les profils en long des rivières sur lesquelles sont situés les aménagements présentent une faible pente, 7 à 10 ‰.

(1) *Rappel (2ème partie : chapitre 15a) : Si on suppose que la retenue de CEYRAC n'est pas étanche, les infiltrations à longue distance ne peuvent rejoindre que le réseau qui alimente la source de SAUVE. Dans la mesure où les débits infiltrés restent faibles, il est difficile de les mettre en évidence en raison de l'importance des débits naturels de la source.*

- Aucune source pérenne ou temporaire à cycle annuel (1) (sauf à QUINSON) n'existait à l'aval de l'ouvrage dans un rayon de 2 km avant le remplissage.

- La karstification :

A) Pour toutes les retenues sauf la CHAUDANNE, la karstification des massifs calcaires intéressés par la retenue, est une karstification évoluée et développée.

B) A GREOUX (zone aval), à GENISSIAT et à QUINSON partiellement, le karst est un karst fossile, exception faite des karsts de versant, bien développés sur les deux rives des retenues de GREOUX et de QUINSON.

A CEYRAC par contre, le karst est actif (en particulier à l'aval immédiat du barrage dans les calcaires jurassiques).

C) Les karsts fossiles ont été colmatés par des apports extérieurs :
- marnes et conglomérats (tertiaires et quaternaires) à GREOUX et à QUINSON,
- argiles glaciaires (quaternaires ?) à GENISSIAT.

A GREOUX et à GENISSIAT, les calcaires karstifiés sont protégés par un tapis étanche qui recouvre 90 % de la surface du bassin versant.

A QUINSON, la couverture marneuse est importante rive droite ; elle est plus réduite en étendue et plus faible en épaisseur sur la rive gauche.

A LA CHAUDANNE et à CEYRAC,il n'y a pas de couverture étanche hormis quelques placages locaux.

● Différence

A GREOUX, à LA CHAUDANNE et à QUINSON en particulier, la fracturation est importante et intense ; à GENISSIAT elle est, par contre, remarquablement faible.

COMMENTAIRES

Les retenues de GREOUX et de GENISSIAT ont un grand nombre de caractères communs :
- hauteur importante du barrage,
- structure tabulaire des séries calcaires,
- karst fossile (ancien) colmaté par des apports extérieurs,
- tapis étanche en surface protégeant les calcaires des infiltrations.

La retenue du barrage de QUINSON a 15 m de profondeur au maximum, celle de CEYRAC 20 m. Elles sont étanches, mais on peut se demander dans quelle mesure on doit comparer des retenues de plus de 100 m de profondeur (GENISSIAT) ou de 60 m (GREOUX) avec des retenues de moins de 20 m.

(1) *Lors des crues décennales, la pluviométrie est généralement assez forte pour faire apparaître des résurgences en de nombreux points et souvent à des cotes très élevées du massif rocheux. Il ne s'agit pas de ce type de source.*

L'étude des retenues non-étanches apporte des éléments de réponse à cette question (voir chapitre 3) : dans la plupart des cas, les fuites apparaissent en général dès les premiers mètres du remplissage (exceptions : KARAOUN, CASTILLON); c'est pour cette raison que les tests de mini-remplissage sont significatifs.

C'est particulièrement vrai pour la retenue de QUINSON où le risque de débourrage par le fond est faible (retenue au fil de l'eau). Pour la retenue de CEYRAC, par contre, qui est une retenue suspendue, une surélévation du plan d'eau pourrait provoquer un décolmatage du fond avec débourrage de puits absorbants.

L'efficacité du colmatage naturel des vides karstiques est très nette à GREOUX, en particulier rive droite.

Sur cette rive, la continuité des fissures karstifiées, la faible longueur des lignes de fuites, l'importance de la karstification, sont autant de caractères favorables aux fuites; seul le colmatage naturel du karst assure l'étanchéité du massif au-delà du voile. Il faut remarquer que le colmatage a été favorisé par la morphologie du karst (karst de fissures) qui a facilité un compactage par gravité.

La présence d'indices de colmatage naturel ne doit cependant pas être considérée comme une garantie absolue de l'étanchéité du massif. A KARAOUN et à VOUGLANS par exemple, le karst a été, comme à GREOUX, colmaté par des apports extérieurs (argilo-graveleux ancien à KARAOUN, morainique quaternaire à VOUGLANS). A VOUGLANS, ces matériaux (qui atteignent des zones profondes du réseau), ont été par la suite déblayés par l'eau. Dans ce cas, l'absence d'une couverture étanche mettant le karst à l'abri des écoulements de surface paraît être un facteur déterminant.

Les colmatages, même profonds, paraissent donc vulnérables dans la mesure où le massif n'est pas recouvert par une couverture étanche qui le met à l'abri des eaux de ruissellement.

- Conclusions pratiques

Ce bilan attire l'attention sur l'importance du colmatage comme facteur d'étanchéité dans les régions vraiment karstiques. Plus que le degré de karstification, la nature du colmatage doit être analysée avec soin. Près des versants, le décolmatage peut avoir dégagé des cavités, dans certains cas spectaculaires (exemple GREOUX) ; mais il peut s'agir de phénomènes de peau qui n'impliquent pas que le karst soit redevenu actif en profondeur.

°
° °

LES RETENUES NON-ETANCHES

RESUME

Sur les 16 retenues étudiées, 10 ont présenté des fuites au moment du remplissage - CAMARASA, BOUVANTE, MONTEJAQUE, CHARMINE-MOUX, CASTILLON, CANELLES, KARAOUN, NEBAANA, VOUGLANS, SAINTE-CROIX.

Les fuites apparaissent en totalité ou en partie, à des sources naturelles qui existaient avant la mise en eau. Les autres résurgences sortent soit par fissures proches des sources principales, soit par d'anciens conduits karstiques. Sur de courtes distances, des cheminements peuvent être liés à des systèmes de diaclases sans qu'il y ait nécessairement karstification au rocher.

Dans le cas des retenues étudiées, les fuites apparaissent à une distance comprise entre 0 et 6 km., distance comptée à partir de la retenue. Pour les retenues "au fil de l'eau", la distance ne dépasse pas 2 km. En général l'émergence la plus éloignée est une source naturelle qui fournit souvent un débit non négligeable.

Les débits de fuite varient selon les retenues de quelques litres à 12 m^3/s. Les forts débits (supérieurs à 1 m^3/s.) apparaissent à moins de 1 km. de la retenue. Les débits augmentent toujours avec l'élévation du plan d'eau; dans certains cas, $Q = f(H)$. Dans de nombreux cas, il y a débourrage et changement brutal de régime avec la montée du plan d'eau.

D'une façon générale, il y a dégradation du terrain et augmentation des débits de fuite dans le temps. Pour 7 barrages sur 10, les fuites apparaissent dès le début des mises en eau.

Les zones d'absorption dans les retenues peuvent être de nature très différente. Il peut y avoir : infiltration générale sur de grandes surfaces, infiltration par des fissures bien individualisées, fuites par des puits absorbants en nombres limités.

NON WATERTIGHT RESERVOIRS

SUMMARY

Out of the 16 reservoirs examined, 10 were affected by leakage when they were filled, i.e. CAMARASA, BOUVANTE, MONTEJAQUE, CHARMINE-MOUX, CASTILLON, CANELLES, KARAOUN, NEBAANA, VOUGLANS and SAINTE CROIX.

Leakage appears wholely or partly at natural springs that existed before impounding. The other resurgences appear either from fractures near the main springs or from old karst galleries on short distances, leakage paths can exist, being linked with joint systems even though the rock may not necessarily be karstified.

Leakage from the storage-lakes examined re-appeared at a distance between 0 and 6 km from the reservoirs. The farthest point of resurgence is generally a natural spring with a not inconsiderable discharge.

Leakage rates vary with the reservoirs from a few litres to 12 m3/s. The high rates (more than 1 m3/s) re-appear less than 1 km from the lake. The leakage rate always increases with lake level. In some cases, $Q = f(H)$. In many cases, there is declogging of some pipes and the underflow regime alters suddenly with rising lake level.

In general, there is ground degradatation and increasing leakage with time. At 7 schemes out of the 10, leakage appeared as soon as filling started.

The absorption zones in the reservoir can be of very different types. There may be generalised infiltration over large areas, infiltration through well separate fractures, or leakage through a limited number of shafts.

CHAPITRE

3

Les retenues non-étanches

● Introduction

Sur les 16 retenues étudiées, 15 ont été mises en eau, 10 d'entre elles ont présenté des fuites lors du remplissage.

Le tableau (fig. 5) intitulé "Caractéristiques des fuites", groupe les principales données chiffrées concernant les ouvrages, les opérations de mise en eau et la nature des phénomènes hydrogéologiques observés durant les remplissages.

L'examen de ce tableau permet de dégager un certain nombre de conclusions.

1 - CARACTERISTIQUES DES FUITES

● Nature des résurgences

Pour toutes les retenues non-étanches, les fuites apparaissent en totalité ou en partie à des sources naturelles qui existaient avant la mise en eau (1).

Ces résurgences contrôlent, dans de nombreux cas, la majeure partie des débits de fuites (2).

Dans le cas de MONTEJAQUE, les fuites apparaissent dans un réseau karstique secondaire, affluent du grand réseau karstique de la grotte DEL GATO.

A CAMARASA et au NEBAANA en rive gauche, les eaux des sources naturelles dont le débit a augmenté avec la mise en eau présentaient un caractère d'eau thermale (température supérieure à la normale, minéralisation). Dans ces deux cas, on note une dégradation des qualités thermales des eaux après la mise en eau (3).

(1) *Exception faite peut-être pour KARAOUN, mais les zones de résurgences ne semblent pas avoir été identifiées.*

(2) *Réciproquement, les sites des retenues de GREOUX, de GENISSIAT et de LA CHAUDANNE (qui se sont révélées étanches au remplissage) sont caractérisés par l'absence de sources permanentes à l'aval du barrage.*

(3) *Il y a donc mélange d'eaux d'origines diverses ; on peut envisager un processus où il y aurait, pendant un premier temps, déplacement des eaux anciennes avec augmentation de débit mais sans mélange des eaux ; puis dans un deuxième temps, dégradation des qualités thermales.*

ΔH hauteur de l'ouvrage

FIG 5

CARACTÉRISTIQUES DES FUITES

* essai de remplissage par bataradage de la D.P

	HAUT.	Vol. $10^6 m^3$	FUITES TOTAL	FUITES DÉBITS MAXIMUM RD	FUITES DÉBITS MAXIMUM RG	FUITES ÉVOLUTION	RÉSURGENCES NOMBRE	RÉSURGENCES DISTANCE	RÉSURGENCES NATURE	RÉSURGENCES DÉNIVELLÉ	RÉSURGENCES GRADIENT	ZONE D'INFILTRATION NATURE	ZONE D'INFILTRATION SURFACE	ZONE D'INFILTRATION EVOLUTION	CHEMINEMENT	TRAITEMENT après remplissage	REMARQUE
CAMARASA bed rock 285	92 m	157	12 m^3/s			augmente avec le remplissage et de 5%/an	25 à 30 individualisées	1400 m. à 50 m.	anciennes Sources et nouvelles émergences	0 à ΔH*		diffuse très etendue	importante points multiples	néant	généralisé dans la masse	injection (voile)	les émergences remontent avec le traitement.
BOUVANTE B.R 547	38 m	1,3	?				1	principale à 5050 m.	ancienne Source "les Freydières"	253 à 283 m.		calc. et marno-calcaires trés fissurés.	réduite près de l'ouvrage	?		tapis	
MONTEJAQUE B.R 820	73,5m	36	4 m^3/s			évolution linéaire avec o/a pour H=20	1 principale	principales 600 à 1000 m.	résurgences dans la grotte située à l'aval.	14 à 44 m.		multiples fissures et puits absorbants	importante	débourrage	conduits Karstiques	traitement de surface	le remplissage a été abandonné
CHARMINE-MOUX B.R 363	18 m	5	0,8 m^3/s	en majeure partie		débourrage à chaque mise en eau.	1 principale + de nombreuses R.G	0 à 1200 m.	source antérieure "la fontaine Noire"	60 m.		localisées (fissures)	5000 m^2	?	conduits Karstiques V=60 m/h	injection et tapis	
CASTILLON B.R 810	100 m	149	0,1 m^3/s	+			?	1000 m.	Sources?	80 m.		inconnue (fissure?)	?			néant	
CANELLES B.R 370	148 m	678	8 m^3/s		+	débourrages successifs.	quelques Sources importantes	300 m.	anciennes Sources-Karst.	0 à ΔH*		fissures très nettes.	inconnue	seuil	conduits Karstiques et fissures	néant	
KARAOUN	60 m	220	0,3 m^3/s	+		augmentent dans les 5 derniers m.	?	?	?			fissures				néant	
NEBAANA B.R 167	62,5m	86	0,15 m^3/s	+ 25 l/s à 90 l/o	75 l/s ↓ x	augmentent avec ΔH	3 ou 4 RG nombreuses en R.D	RG 1300m. RD 400m.	R.D. diaclases avec calcite. RG source thermale.	10 m.		R.D fissures R.G inconnues			mini-fissures	néant	
VOUGLANS B.R 300	130 m	600	0,3 m^3/s	300 l/s			1 source principale	1500 m.	source Karstique.	40 m. + ΔH*		fissures et joints?	?	?	réseau Karstiques V=300 à 1000 m/h	néant	
SAINTE-CROIX B.R 400	90 m 5 m*	800		+?					source Karstique.				3000 m^2 mini mise en eau		réseau Karstique. V=50 à 150 m/h		

- Autres types de résurgences :

Hormis le groupe des sources naturelles, les émergences peuvent se diviser en 3 catégories :

- les émergences qui apparaissent à proximité des sources naturelles et qui ne sont que des fuites de celles-çi par les fissures de la masse rocheuse où se situe le griffon (ex : NEBAANA rive gauche). Ce type d'émergence est lié à un engorgement du réseau qui alimente la source naturelle.
- les émergences localisées sur des fissures et des joints (ex : NEBAANA rive droite).
- les émergences qui correspondent au débourrage de conduits karstiques fossiles (ex : CHARMINE-MOUX).

● Distance maximale des fuites

Les fuites apparaissent entre 0 et 6 km des retenues.

Si on distingue les deux groupes de retenues définis dans le chapitre précédent, à partir du critère hydrogéologique du niveau de base :

A) groupe "fil de l'eau" : *CAMARASA*
CANELLES
CASTILLON
NEBAANA
SAINTE CROIX ("mini-mise en eau")
VOUGLANS

B) groupe "suspendu" : *BOUVANTE*
CHARMINE-MOUX
KARAOUN
MONTEJAQUE

on constate que pour le groupe A les longueurs de circulations sont inférieures à 2 km ; pour le groupe B elles atteignent 6 km.

Pour toutes les retenues (sauf CAMARASA qui est un cas particulier, et peut-être MONTEJAQUE), l'émergence la plus éloignée est une source naturelle ; c'est ce griffon naturel qui fournit, dans de nombreux cas, le plus fort débit (BOUVANTE, CHARMINE-MOUX, VOUGLANS).

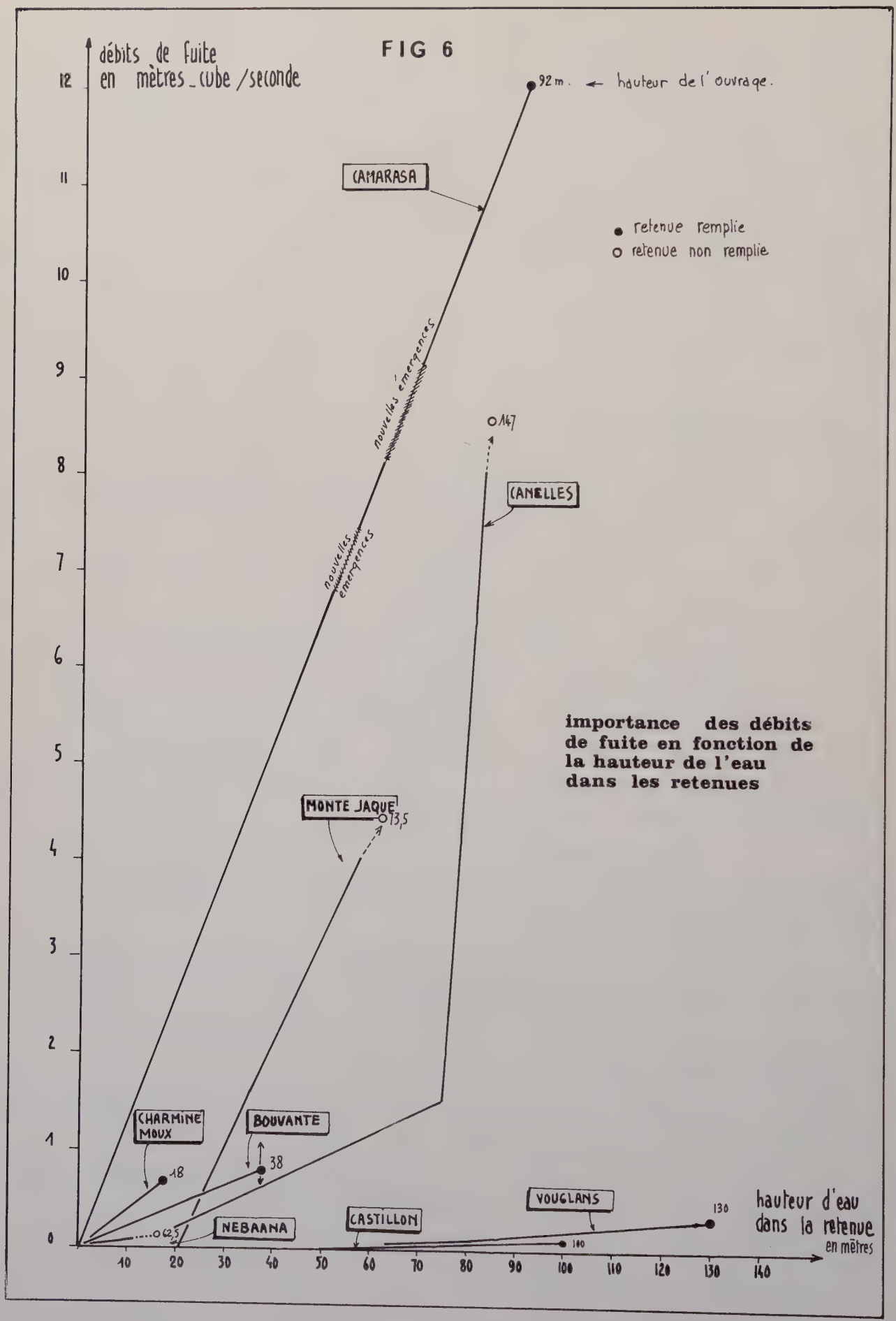
Les émergences qui ne sont pas des sources naturelles ou qui ne sont pas situées à proximité de source naturelle (CAMARASA, CANELLES, NEBAANA rive droite), se trouvent à moins de 1000 m de la retenue.

● Débits de fuites

La figure 6 présente la valeur et l'évolution des débits des fuites en fonction de la hauteur du plan d'eau dans le réservoir.

Ces débits étant d'importance très diverse, on peut distinguer 2 groupes:

FIG 6



importance des débits de fuite en fonction de la hauteur de l'eau dans les retenues

- le groupe des forts débits : CAMARASA : 12 m3/s
  CANELLES : 8 m3/s
  MONTEJAQUE : 4 m3/s
- le deuxième groupe est caractérisé par des débits totaux de fuites inférieurs à 1,2 m3/s.

Les fuites du premier groupe apparaissent à proximité immédiate des ouvrages :

- à CAMARASA, la principale résurgence (la source A2, débit 3 m3/s) est située à 250 m à l'aval du pied du barrage ;
- à CANELLES, l'eau ressort à 300 m à l'aval de l'ouvrage ;
- à MONTEJAQUE, la distance est voisine de 1 km.

Il est cependant possible, dans ce dernier cas, de supposer qu'une exploration poussée du réseau karstique d'où sortent les fuites (voir 2ème partie : chapitre 4), permettrait de s'approcher plus près du réservoir.

Les fuites du deuxième groupe (débit de fuite inférieur à 1,2 m3/s) parcourent des distances beaucoup plus grandes.

- Evolution des débits de fuites en fonction de la cote du plan d'eau de la retenue

Cet aspect du problème des fuites est malheureusement le plus souvent mal connu. La difficulté, dans certains contextes hydrogéologiques, de mesurer les débits de fuites, est une des causes du manque de renseignements ; à VOUGLANS, par exemple, les fuites sortent par des griffons multiples situés dans le lit de la rivière à l'aval du barrage, au-dessous du niveau de l'eau.

Dans tous les cas, les débits augmentent avec la cote du plan d'eau.

Pour les retenues de MONTEJAQUE et de BOUVANTE (voir 2ème partie), la courbe des débits de fuites en fonction de la cote du plan d'eau est sensiblement une droite.

Pour les retenues de CANELLES et de KARAOUN, les débits de fuites augmentent brutalement quand la cote du plan d'eau atteint un certain niveau (seuil).

A CANELLES, à la cote 450, les débits de fuites passent de 1,2 à 6 m3/s, et plus.

A KARAOUN, les fuites augmentent rapidement pour la tranche des 5 derniers mètres. Il s'agit vraisemblablement pour cette retenue d'un défaut du voile d'injection à proximité de la surface.

- Commentaires

Un classement des retenues en groupes distincts selon l'importance des débits de fuites est arbitraire dans la mesure où les hauteurs d'eau dans les retenues sont très variables.

L'allure des courbes de débits de fuites (fig. 6) suggère en effet que, pour CHARMINE-MOUX et BOUVANTE, des barrages plus élevés auraient fait évoluer les débits d'une manière telle que ces retenues auraient dû être classées dans le groupe des forts débits avec CAMARASA, CANELLES et MONTEJAQUE.

Pour BOUVANTE, les débits de fuites (source des FREYDIERES) auraient vraisemblablement augmenté de façon linéaire avec une élévation du plan d'eau (comme à MONTEJAQUE).

Pour CHARMINE-MOUX, les fuites à grande distance (FONTAINE NOIRE) auraient sans doute augmenté de façon linéaire, mais en même temps, l'apparition de nouvelles résurgences à proximité de l'ouvrage avec augmentation rapide des débits aurait été possible à la suite de débourrages (comme à CANELLES).

- Evolution des fuites dans le temps

Pour CHARMINE-MOUX, CANELLES, CAMARASA, il y a eu dégradation du terrain (débourrage karstique typique à CANELLES et CHARMINE-MOUX).

A CAMARASA, les débits de fuites pour un plan d'eau de hauteur déterminée, augmentent avec le temps (5 % par an). A CHARMINE-MOUX, il n'y a pas retour à l'état antérieur quand on baisse le plan d'eau, après le remplissage. La dégradation du terrain s'effectue donc à une cote inférieure à celle du fond de retenue.

- Apparition des fuites

Pour les barrages de CAMARASA, BOUVANTE, MONTEJAQUE, CHARMINE-MOUX, CANELLES, NEBAANA, les fuites apparaissent dès le début de la mise en eau et, dans certains cas, pendant les travaux préparatoires (par exemple pendant la mise en service de la dérivation provisoire à CAMARASA). A CHARMINE-MOUX, il y a disparition des eaux d'exhaure de la galerie d'amenée lors de la perforation, avec résurgence à l'aval du site.

- Les zones d'infiltration

L'étendue des zones de pertes et la nature des points d'infiltration sont généralement mal connues.

Une recherche expérimentale des zones suspectes a été faite sur plusieurs retenues par des techniques différentes :

- à CAMARASA par coloration,
- à BOUVANTE par entraînement de particules (confetti),
- à NEBAANA par coloration.

Ces expériences et les observations du contexte géologique conduisent à distinguer :

1) fuites par infiltrations à travers des surfaces importantes avec des points d'absorption multiples :

- CAMARASA : plusieurs dizaines de milliers de m2,
- CHARMINE-MOUX : dix mille m2,
- MONTEJAQUE : plusieurs dizaines de milliers de m2.

2) fuites par des fissures bien individualisées, karstiques ou non. C'est le cas général dans les calcaires massifs :
- BOUVANTE,
- CANELLES,
- VOUGLANS (?),
- NEBAANA (rive droite).

3) fuites par entonnement dans des puits absorbants karstiques :
- MONTEJAQUE,
- BOUVANTE (en partie).

2 - BILANS

Caractères communs à toutes les retenues non-étanches :

- Les fuites apparaissent à des sources préexistantes, situées à l'aval,
- Les longueurs de circulation sont inférieures à 6 km en ligne droite.
- Les calcaires karstiques des versants de la cuvette sont exposés ou recouverts par des placages (morainiques) de faible épaisseur.
- Les fuites apparaissent dans 7 cas sur 9 dès le début du remplissage.
- La couverture rocheuse à la verticale des cheminements souterrains est de faible épaisseur.

Si on divise les ouvrages en deux groupes, "les retenues suspendues" et les retenues "au fil de l'eau", il est possible de définir des caractères plus spécifiques :

A) Retenues "au fil de l'eau" :
Les fuites apparaissent à moins de 2 km à l'aval du barrage (1).
Les débits importants (CAMARASA, CANELLES) apparaissent à des résurgences proches de l'ouvrage (quelques centaines de mètres).

B) Retenue "suspendues" :
Exception faite de CEYRAC, avec les réserves qui ont été exprimées, toutes les retenues "suspendues" présentent des fuites.
Pour ce groupe de retenues, il ne faut considérer que la longueur de fuite ne puisse pas dépasser 6 km (maximum observé dans les exemples analysés) (2).

(1) *Cette constatation montre l'interêt de réaliser la carte des périmètres de fuites. Seules les zones aval et amont situées à l'intérieur du périmètre 2 km peuvent être considérées comme franchement suspectes et nécessitent un dispositif d'étude et de surveillance. A l'extérieur de ce périmètre, le risque de voir apparaître des résurgences ou d'être en présence d'infiltrations peut être considéré comme plus faible.*

(2) *En présence d'une retenue suspendue, la construction des périmètres de fuites apparaît moins intéressante. En raison de l'importance des distances de circulation possibles, les zones suspectes seront le plus souvent limitées par les changements de nature des terrains.*

CHAPITRE

4

Synthèse

PLAN

1 - Nature de la fuite karstique

2 - Risque de fuite - Règles empiriques

3 - Aspects spécifiques des traitements d'étanchéité en terrain karstique

4 - La piézométrie dans le massif calcaire après remplissage

5 - Caractère artificiel des lacs de barrages en pays calcaire

°
° °

RESUME

La fuite karstique correspond à des circulations empruntant des réseaux de drainage naturel préexistants.

Le risque de fuite dépend des rapports existants entre les zones mouillées par les eaux de la retenue et les réseaux karstiques du massif calcaire. La position des émergences et les cheminements existent déjà dans le massif avant toute mise en eau. L'étanchéité est fonction de la perméabilité des zones situées entre la retenue et l'extrémité amont des réseaux karstiques; si un réseau atteint la retenue -c'est le cas des retenues suspendues-, seul un colmatage peut assurer l'étanchéité.

En règle générale, pour qu'il y ait fuite, il faut que le réseau s'approche à moins de 150 m. (ordre de grandeur) de la retenue. Les retenues étudiées permettent de vérifier directement ou indirectement cette règle.

Pour les retenues au fil de l'eau, l'absence de fuite à plus de 2 km. est conforme aux études statistiques sur la fréquence des grands réseaux (90 % des sources contrôlent moins de 2 km² de bassin versant, les sources dont le débit dépasse 25l/s. contrôlent 10 % seulement de la surface des GRANDS CAUSSES). Seules les retenues suspendues peuvent, sous certaines conditions, donner lieu à des fuites à grande distance.

Les fuites augmentent avec la montée du plan d'eau. Les augmentations brutales sont liées à des débourrages qui se produisent, dans la majorité des cas, dans les mois qui suivent la mise en eau. La réduction des fuites par colmatage naturel est un phénomène rare (CEYRAC ?).

Dans un réseau, le risque de débourrage apparait dès que les débits de fuite atteignent la valeur des débits maxima des crues naturelles du réseau. Les karsts de joints sont plus vulnérables au phénomène de débourrage que les karsts de fissure. Le délavage d'un joint ne peut être évité qu'en supprimant dans ce joint les écoulements en charge. L'érosion mécanique de la matrice rocheuse peut se produire si les eaux sont chargées; la vitesse du phénomène est très mal connue. Dans la grande majorité des cas, l'érosion chimique ne joue aucun rôle à l'échelle de la durée de vie des retenues de barrage.

Le traitement de la fuite karstique nécessite, pour ne pas être aléatoire, la vidange de la retenue. Même à retenue vide, le traitement du karst est difficile si les conduits sont bien individualisés. Il est préférable d'utiliser au maximum, pour traiter le terrain, les ouvertures naturelles du réseau. Le cheminement des coulis peut être très important notamment dans les karsts de joints; on peut, dans certains cas, arriver au claquage des remplissages argileux.

Dans la mesure où une retenue présente des fuites, les différentes hypothèses que l'on peut faire sur la piézométrie qui s'établit dans le massif calcaire, conduisent toutes à admettre que localement, les gradients des écoulements sont nettement supérieurs aux gradients que l'on peut mesurer dans un milieu non perturbé. Le lac de barrage, quand il y a écoulement en charge à travers une rive, apparaît comme un paysage dont on ne trouve pas d'équivalent dans le milieu naturel. Il doit être considéré comme un paysage artificiel.

°°°

SYNTHESIS

SUMMARY

Leakage of karstic origin is flow through pre-existing natural drainage systems.

Risks of leakage depend on the relationship between the zones in contact with the water in the reservoir and the karst networks in the limestones. The positions of resurgences and the leakage paths already exist in the rock-mass before impounding starts. Watertightness depends on the permeability of the zones which are between the reservoir and the upstream end of the karst networks. If a karst network reaches the reservoir - which is is the case with suspended reservoirs -, only plugged channels can provide watertightness.

As a general rule, the karst network must be nearer than about 150 m reservoir if leakage is to occur. This rule can be verified directly or indirectly at the reservoirs studied.

The absence of leakage further than 2 km from "run-of-river" reservoirs agree with the statistical studies on the frequency of major networks (90 % of springs control less than 2 km2 of catchment area, springs with a discharge greater than 25 litres/s control only 10 % of the area of the GRANDS CAUSSES). Only "suspended" reservoirs can be affected by leakage over long distances under certain conditions.

Leakage increases with the reservoir filling. Sudden increases are connected with decloggings that occur in most cases within the first few months following impounding. Self-sealing as a cause of reduced leakage is rare (CEYRAC ?).

The risk of decloggings in a network appears as soon as leakage reaches a value equal to the maximum natural flood flow rate in the system; "joint karsts" are more vulnerable to declogging than "fracture karsts". The only way to stop the filling material being washed out of a joint is to eliminate pressure flow in it. Mechanical erosion of the rock matrix can occur if the water carries a solid load, but little is known about the erosion rate. In the great majority of cases, chemical erosion has no effect when considering the normal working life of the schemes.

Treating leakage of karstic origin means the reservoir must be emptied if nothing is to be left to chance, and even in this case, the work is difficult if separate distinct channels are involved. It is preferable to make use of the network natural openings as far as possible in treating the rock. The distance covered by the grout can be very large, especially in joint karsts. In some cases, it may eventually fracture the clay filling.

Insofar as a reservoir is affected by leakage, the various assumptions that can be made as to the piezometrie slope in the limestone mass all conduce to agree that flow gradients are locally distinctly higher than those that can be measured in an undisturbed system. The reservoir lake giving rise to pressure flow through a bank is a land-picture with no equivalent in nature. It must be considered as an unnatural landform.

1 - NATURE DE LA FUITE KARSTIQUE (1)

Les cas étudiés font clairement apparaître que les fuites les plus notables, à partir d'une retenue en terrain karstique, correspondent à des circulations empruntant des réseaux de drainage naturel préexistants (2), appartenant au système karstique du massif.

Deux conséquences peuvent être tirées de cette constatation :

1) Ce sont les rapports géométriques entre les réseaux karstiques existants et la surface mouillée de la retenue qui conditionnent en grande partie l'importance du risque de fuite. La karstification du massif rocheux est donc une condition nécessaire pour qu'il y ait fuite, mais elle n'est pas suffisante.

2) Hormis les zones d'absorption, ce ne sont ni la hauteur de l'ouvrage, ni la longueur des lignes de fuites théoriques qui commandent la position des émergences et la localisation des cheminements souterrains. Les caractéristiques géométriques du cheminement emprunté par les fuites sont indépendantes de la retenue (3).

C'est donc au réseau karstique tel qu'il a été défini dans la première partie (chapitres 2 et 3), qu'il faut faire référence pour imaginer les caractéristiques des cheminements de fuite et poser efficacement le problème des traitements.

- Liaison retenue-réseau karstique

Le réseau karstique qui amène les eaux à l'émergence peut se développer jusqu'à la retenue. Dans ce cas, les zones mouillées de la retenue appartiennent aux zones d'absorption ou de transfert du réseau. Ce sera le cas général des retenues du groupe "retenues suspendues". C'est pourquoi, seule l'existence d'un colmatage de surface peut assurer l'étanchéité des retenues de ce groupe.

Par contre, dans d'autres cas, les réseaux n'atteignent pas la retenue. Pour qu'il y ait fuite, il faut alors que la fissuration des parois de la retenue soit suffisante pour assurer un relai entre la retenue et le réseau aval qui va véhiculer les eaux infiltrées.

(1) *Rappelons les réserves faites au sujet des massifs dolomitiques.*

(2) *Par exemple, le colorant injecté dans n'importe lequel des piézomètres de la rive droite du VERDON à SAINTE CROIX (chapitre 17, 2ème partie), réapparaît toujours à la source pérenne, mettant en évidence un drainage organisé.*

(3) *Cela résulte du fait que, sauf très localement et dans quelques cas particuliers, la dégradation du massif rocheux résultant de la karstification n'est pas suffisante pour donner à celui-ci une perméabilité dans toutes les directions.*

2 - LE RISQUE DE FUITE - REGLES EMPIRIQUES

Le risque de fuite lors du remplissage apparaît donc lié à l'existence d'un système naturel de drainage (en activité ou en sommeil) qui se développe dans le massif rocheux calcaire et qui atteint ou se rapproche à faible distance de la retenue.

● Longueur des cheminements de fuite

Si on considère les formations sédimentaires non karstiques, comparables aux formations calcaires par l'épaisseur des bancs, la nature des joints et la fracturation (par exemple les marno-calcaires francs, les quartzites, les grès), on peut faire la constatation suivante : pour les ouvrages construits dans de tels contextes géologiques, les fuites n'apparaissent qu'à proximité de l'ouvrage ; généralement, un voile de 100 m de développement perpendiculairement aux fouilles assure à la retenue une étanchéité suffisante.

On peut admettre que la fissuration naturelle du calcaire (fissuration tectonique et décompression), en l'absence de toute karstification, est capable à proximité des versants, d'assurer la pénétration et la circulation de l'eau sur 150 m environ.

- Règle : On peut donc proposer la règle empirique suivante : pour qu'il y ait fuite, il faut que le réseau karstique de drainage s'approche à moins de 150 m de la retenue.

- Validité de cette règle

L'existence d'un réseau karstique débouchant à l'aval et s'approchant de la retenue a pu être vérifiée dans plusieurs cas : à SAINTE CROIX par exemple, où à partir d'un sondage situé à moins de 150 m de la retenue, une coloration a rejoint des sources naturelles aval ; à VOUGLANS également (bien que la distance des sondages à la retenue soit supérieure).

Mais, dans bien des cas cependant, l'absence de sondages n'a pas permis d'effectuer une telle vérification. Le raisonnement suivant permet néanmoins de vérifier la validité de cette règle : pour l'ensemble des retenues étudiées, les débits spécifiques des bassins versants karstiques sont compris entre 6 et 12 l/s/km2, exceptionnellement 25 l/s/km2 pour la retenue de BOUVANTE et pour le JURA.

Dans un rayon de 2 km autour d'une retenue (zone où apparaît la plupart des fuites), toute source dont le débit, avant la mise en eau, dépassait 10 à 20 l/s, a donc un bassin versant qui peut atteindre la retenue.

Si on examine les cas concrets étudiés dans la 2ème partie :

CAMARASA (sources thermales)
BOUVANTE (les eaux noires)
MONTEJAQUE (CUEVA DEL GATO)
CHARMINE-MOUX (source des FREYDIERES)
VOUGLANS (source de la PORCHERIE)

on constate que toutes ces sources où devaient par la suite apparaître les fuites, avaient un débit suffisant pour que leur bassin d'alimentation atteigne la retenue.

Ces remarques confirment, d'une façon indirecte, que les fuites dans tous les exemples cités, franchissent des distances très faibles (ou nulles) en terrain vierge de tout système préalable de drainage organisé.

- Signification de l'absence de fuite à plus de 2 km

Le tableau (fig. 2, chapitre 1, 1ère partie) fournit les chiffres suivants : dans la région des GRANDS CAUSSES (surface 5053 km2), sur 455 sources karstiques pérennes, 396 (soit 90 %) ont un débit entre 0 et 25 1/s, c'est-à-dire, compte tenu des débits spécifiques, un bassin d'alimentation inférieur à 2 km2. Cette étude statistique donne des résultats qui peuvent être considérés comme représentatifs des grandes régions calcaires tabulaires karstifiées.

On peut considérer que si les fuites des retenues se font en utilisant des réseaux actifs existants, il y a une chance sur 10 seulement (1) pour que ces réseaux aient plus de 2 km2 de bassin versant.

Si on admet que la distance franchie en terrain vierge est faible, il est logique que toutes les fuites constatées se localisent à l'intérieur à une surface de 2 km de rayon à partir de la retenue.

- Conditions pour qu'il y ait des fuites à grande distance

La possibilité de fuites à grande distance implique l'existence, dans le massif rocheux, de réseaux de grande extension.

Or, les chiffres qui viennent d'être cités (voir également 1ère partie : chapitre 1) montrent la rareté des réseaux de grande envergure ; la probabilité de fuites à grande distance est donc faible. D'autre part, le côté spectaculaire des sources importantes attire plus facilement l'attention du projeteur et, dans bien des cas, l'amène à renoncer ou à modifier son projet.

(1) *Rappelons cependant que tout site de barrage est en général un point singulier par la géologie ou par la tectonique ; les moyennes statistiques doivent pour cette raison être maniées avec précaution.*

Dans une certaine mesure, les fuites à grande distance peuvent passer inaperçues. Si les débits de fuites sont faibles, et rejoignent un réseau important, l'augmentation corrélative du débit de la source pourra être inférieure à la précision des mesures de jaugeage (5 % dans la majorité des cas). C'est l'ambiguité qui existe par exemple pour les retenues de KARAOUN ou de CEYRAC dont les fuites peuvent rejoindre des systèmes karstiques où les débits dépassent le m3.

Citons pour illustrer ces difficultés de mesure, le cas des pertes du VERDON au cours de la traversée du grand canyon (200 à 300 l/s) vers la source de FONTAINE L'EVEQUE (6 m3/s ; distance 15 km). Les fuites soupçonnées depuis le début du siècle n'ont pu être démontrées par coloration et évaluées par jaugeage différentiel qu'en 1971, grâce à des conditions hydrologiques exceptionnelles.

• Un autre facteur limite également les possibilités de fuites à grande distance. Il faut pour assurer l'écoulement des eaux karstiques, une pente égale ou supérieure à 5 à 7 ‰. Si le profil de la rivière sur laquelle est édifié l'ouvrage ne présente pas une pente supérieure à 7 ‰, la possibilité pour les eaux souterraines de circuler parallèlement à la rivière devient pratiquement nulle dans le cas des retenues au fil de l'eau. Les eaux de pluie infiltrées ressortent en suivant des cheminements perpendiculaires à la rivière.

Par contre, pour toutes les retenues suspendues, l'eau infiltrée bénéficie d'un potentiel de dénivelée qui lui permet, si le contexte est favorable, de parcourir des distances plus longues. Pour ce type de retenues, la longueur des cheminements karstiques est le plus souvent réglée par des données structurales, sans que le potentiel de dénivelée ait été utilisé au maximum.

• Evolution des fuites

L'étude des cas réels montre que :

1) les fuites augmentent avec la charge (dans tous les cas),
2) les fuites peuvent augmenter brutalement lorsque l'eau atteint certains niveaux (2 cas sur 9),
3) les fuites augmentent dans certains cas avec le temps pour une même cote du plan d'eau (2 cas sur 9),
4) le colmatage des retenues n'a pas été observé (sauf peut-être au barrage de CEYRAC),
5) les décolmatages se produisent dans un laps de temps relativement très court (quelques mois au maximum après la stabilisation du niveau d'eau).

• Les débits de fuites

Les débits de fuites sont évidemment limités par les pertes de charge.

Ces dernières peuvent se produire :

1) soit dans la zone proche de la surface topographique, cette zone jouant le rôle d'un filtre. C'est le cas observé durant la mini-mise en eau du barrage de SAINTE CROIX.

2) soit dans toute la masse, exemple CAMARASA (1) ; dans ce cas, la perméabilité du terrain est générale (voir piézométrie à l'aval du barrage, chapitre 2, 2ème partie).

3) soit dans les conduits karstiques ; dans ce cas, il y a mise en charge du réseau; c'est un phénomène naturel en période de crues, illustré par les expériences de FONTAINE L'EVEQUE : au cours de ces périodes, le réseau injecte de l'eau dans le massif et des émergences temporaires apparaissent autour de l'émergence habituelle.

Inversement, à charge hydraulique égale, les débits augmentent s'il y a diminution des pertes de charge à la suite de modifications géométriques et morphologiques de la section de contrôle.

Ces modifications peuvent avoir 2 origines :

1) érosion ou entraînement des matériaux de colmatage (c'est le débourrage) ;
2) érosion chimique ou mécanique de la matrice rocheuse.

● Conditions et seuils d'érosion

L'étude du milieu karstique (1ère partie) a conduit à préciser les conditions d'érosion.

On sait que l'évolution du milieu karstique (à l'exception peut-être de l'érosion chimique) paraît se faire en grande partie en période de crue.

L'analyse des courbes des débits classés des sources karstiques montre que le débit n'est supérieur au double du débit moyen annuel que pendant des périodes de temps très réduites (ordre de grandeur 5 % du temps total).

Dans ces périodes de débit de pointe, les vitesses d'écoulement peuvent être multipliées par 5 ou 10 et les mises en charges se faire sur 20 à 50 m ou plus.

C'est uniquement durant ces périodes que l'on constate des entraînements des matériaux de remplissage, galet, argile, plancher de calcite, etc. La débâcle est d'autant plus importante que la durée entre les crues sera plus longue.

Autrement dit, dans la majorité des cas, la morphologie du réseau karstique permet l'écoulement des débits moyens pratiquement sans érosion (la limpidité des eaux et l'exploration spéléologique confirment d'ailleurs cette appréciation).

Le risque de débourrage et d'évolution intense du réseau apparaît dès que les débits de fuites atteignent la valeur habituelle des débits de pointe du réseau sollicité.

● Le débourrage

Le débourrage est le phénomène d'entraînement, par l'eau, des matériaux qui remplissent les vides karstiques (CANELLES, CHARMINE-MOUX).

(1) *Rappel : L'imprégnation générale est due à la nature dolomitique de la roche.*

La possibilité pour un réseau karstique de transiter des matériaux de forte granulométrie sur des distances importantes, ne permet pas de limiter aux zones proches de l'émergence les parties du réseau où peuvent se produire des débourrages (1).

Tant qu'il n'y a pas écoulement, la pression subie par le bouchon qui colmate un conduit correspond à la différence de cote entre le plan d'eau et la cote de ce même bouchon, 80 m à CAMARASA, 30 à 40 m à CHARMINE-MOUX.

Les essais réalisés sur le réseau de FONTAINE L'EVEQUE ont permis d'étudier le mécanisme d'un débourrage provoqué :

Un bouchon argilo-graveleux de 20 m de long a résisté plusieurs semaines à une charge hydrostatique d'une dizaine de mètres avant d'être détruit. Antérieurement à cette période, des pressions supérieures (20 à 30 m) avaient été appliquées durant des durées très courtes (15 à 30 minutes).

Dès le début de chaque expérience et lorsque la cote du plan d'eau dépassait la cote du bouchon, des venues d'eau trouble pouvaient être observées. Quelques heures avant la destruction du bouchon au cours de l'essai de longue durée, les venues d'eau ont augmenté. La débâcle fut un phénomène brutal.

La mise en eau d'un ouvrage soumet donc très souvent les remplissages à des pressions égales ou proches des pressions créées par l'engorgement des réseaux en périodes de crues exceptionnelles ; dans le cas des crues naturelles, des contre-pressions à l'aval des étroitures peuvent réduire la valeur de la résultante des forces qui s'exercent sur le colmatage.

Les expériences réalisées et les observations montrent qu'il est nécessaire de distinguer deux cas : le cas des conduits de joints et le cas des "karsts" de fissures.

- Le joint de stratification karstifié et colmaté est généralement rempli d'un matériau argileux qui laisse un vide plus ou moins grand en calotte. S'il y a mise en charge du joint, il y a circulation d'eau en calotte et un contact argile-eau s'établit sur une grande surface. L'argile plus ou moins indurée avant la mise en eau s'imprègne et perd peu à peu sa résistance. Tant que le joint reste en charge, l'imprégnation se poursuit ; il y a lavage continu du joint par affaiblissement progressif de la résistance de l'argile, de plus en plus saturée d'eau, à l'érosion. Les fuites peuvent donc, après une période de stabilisation, augmenter même s'il y a diminution des vitesses locales du courant d'eau.

On peut proposer la règle suivante : Pour les karsts de joints, le lavage progressif du joint ne peut être évité qu'en supprimant l'écoulement en charge.

(1) *Cette possibilité a été vérifiée notamment à CHARMINE-MOUX. L'injection (sans vidange totale de la retenue) de produits de forte granulométrie dans le réseau, 1 km à l'amont de la source, a été suivie de la ressortie partielle de ces matériaux à l'émergence.*

Il faut malheureusement rappeler que très souvent, en cas de débourrage, la capacité de la retenue ou ses conditions d'exploitation ne permettent pas de baisser le plan d'eau pour réduire la pression.

Dans les karsts de fissures (verticales le plus souvent), la nature du remplissage (concrétions, blocs formant squelette) et le compactage de ces matériaux par gravité, font que les circulations au contact des épontes sont difficiles. L'eau circule généralement en écoulement libre à la surface du remplissage, sur un plancher plus ou moins concrétionné.

Les fuites qui empruntent ce type de conduit se stabilisent beaucoup plus facilement.

- Erosion mécanique de la matrice rocheuse

Après débourrage et lavage des fissures, les débits se stabilisent, finalement limités par perte de charge sur des diaphragmes rocheux ; localement, la vitesse de l'eau peut être suffisante pour provoquer une érosion mécanique de ces diaphragmes. En principe, une évolution des débits peut être envisagée. Il n'y a cependant érosion mécanique que dans la mesure où l'eau charrie des matériaux abrasifs. En général, après un débourrage, les eaux, d'abord troubles et chargées, se clarifient peu à peu, puis en quelques jours redeviennent parfaitement claires.

Dans la mesure où les seuls matériaux mis en suspension sont des argiles, il n'y a pas érosion. Mais la désorganisation d'un remplissage libère bien souvent, non seulement des argiles, mais également des éléments durs beaucoup plus gros (graviers, cailloux, blocs) à pouvoir abrasif. En général, ces éléments n'atteignent pas l'émergence ; ils se déposent dans les zones où la vitesse du courant descend au-dessous de la vitesse limite d'entraînement (1).

En pratique :Un trouble inhabituel (2) des eaux à l'émergence signifie que des dépôts sont remis en circulation. Parmi ceux-ci, les plus fins atteignent la source, mais des dépôts de forte granulométrie et à pouvoir abrasif peuvent également être déplacés, à l'intérieur du réseau, sans atteindre la sortie. Seule une analyse détaillée de l'évolution des débits permettra de préciser la nature du phénomène.

Par contre, aucun exemple ne permet de supposer que des matériaux à pouvoir abrasif puissent être mis en circulation sans que des "fines" soient également mises en suspension provoquant un trouble visible à l'émergence. On peut donc estimer que, lorsque les eaux sont claires, le risque d'érosion des diaphragmes rocheux est pratiquement nul.

(1) *Cf. expérience de débourrage à FONTAINE L'EVEQUE.*

(2) *Certaines sources présentent des eaux légèrement troubles (voir 1ère partie).*

Photo R. THERO

DEPOTS DE CARBONATE DANS UNE GALERIE D'INJECTION

Barrage de CANELLES, galerie d'injection en rive droite.
Après les travaux d'injection, des dépôts importants de carbonate se sont formés dans les galeries situées à proximité du voile. On remarque le rôle joué par les sondages.
Le radier de la galerie est entièrement recouvert sur plusieurs centimètres d'épaisseur par des "pisolithes" artificielles carbonatées. Cette photo montre la difficulté de maintenir en place les coulis quand les circulations sont actives dans le massif.

Remarque :

L'exploration par plongée des réseaux noyés, creusés dans les massifs dolomitiques, a montré la présence fréquente dans ces réseaux de véritables bancs de sables dolomitiques qui représentent un matériau d'abrasion. Ces bancs de sable se déplacent à chaque crue. Remis facilement en mouvement (par exemple par le battement des palmes des plongeurs), ils ont été à l'origine de nombreux incidents pour ces derniers (blocage des détendeurs, ...)(renseignements G.E.P.S., Marseille). Ce type de dépôts n'existe pas dans les massifs calcaires. Par ce caractère, les massifs dolomitiques se différencient encore une fois des massifs calcaires et doivent être considérés comme plus vulnérables à l'érosion que ces derniers.

- Erosion chimique

L'analyse chimique des eaux et les dépôts de carbonates dans les galeries (photo ci-contre (1)) montrent la réalité de l'entraînement chimique par les eaux circulant à travers le massif rocheux (voir 1ère partie : chapitre 5, paragraphe 2).

Ce mécanisme d'érosion sera d'autant plus actif que la teneur en carbonates des eaux de la retenue sera plus faible. Cette teneur est étroitement liée à la nature géologique du bassin versant.

Actuellement, il s'agit d'une question mal connue. Dans la grande majorité des cas, il ne semble pas que l'érosion chimique agisse à une vitesse suffisante pour poser un problème compte tenu de la durée de vie d'un barrage.

- Problème du déplacement d'eaux anciennes

En présence de dolomies qui sont, dans bien des cas, des roches-réservoirs imprégnées dans la masse, on doit envisager, lors du remplissage de la cuvette, la possibilité de voir s'amorcer un phénomène particulier.

En profondeur, avant la mise en eau, sous le niveau des écoulements de base (cas des retenues au fil de l'eau), les eaux qui imprègnent la dolomie peuvent être des eaux anciennes (plusieurs centaines d'années), stagnantes et en équilibre chimique avec les conditions physico-chimiques du milieu. Dans ce cas, la mise en eau de l'ouvrage peut provoquer un déplacement de ces eaux qui remonteront vers la surface et qui seront remplacées par des eaux chimiquement moins chargées. Le phénomène peut avoir deux conséquences :

1) les eaux remontantes, sursaturées par rapport aux nouvelles conditions physiques, engendrent des dépôts ;
2) les nouvelles eaux qui imprègnent les dolomies ont une action érosive sur la roche-mère.

En pratique, ce phénomène ne présente un danger que si l'érosion chimique de la roche profonde se poursuit à une vitesse appréciable.

(1) *Dans le cas de CANELLES, il s'agit vraisemblablement d'une dissolution des coulis d'injection beaucoup plus vulnérables que le rocher.*

3 - ASPECTS SPECIFIQUES DES TRAITEMENTS D'ETANCHEITE EN TERRAIN KARSTIQUE

Il ne s'agit pas d'ébaucher ici un traité sur l'injection des terrains karstiques mais uniquement de faire le point sur les caractères spécifiques des traitements par injection des zones karstifiées.

● Les observations

Jusqu'à maintenant, en présence de fuites typiquement karstiques, il a toujours été nécessaire de vidanger les retenues pour réaliser un traitement d'étanchéité par injection.

La possibilité de traiter une fuite de type karstique lorsqu'il y a écoulement implique que l'on soit en mesure d'introduire dans le terrain un matériau d'une granulométrie telle qu'il se bloque sur une étroiture. Si cela s'avère possible, on peut arriver au colmatage par utilisation de matériaux de granulométrie décroissante.

Le mécanisme se produit de façon naturelle dans certains cas : par exemple, les poljés drainés par des puits absorbants peuvent être noyés si des apports (arbres, branchages, etc.) colmatent les dolines d'absorption (1) ; de même, les rivières souterraines, alimentées par une perte bien individualisée, peuvent s'engorger à la suite de l'entraînement dans le réseau de matériaux flottés.

Mais ce mécanisme est toujours un phénomène de surface (2) ; en effet,la morphologie du réseau karstique est caractérisée par une réduction du nombre des conduits de l'amont vers l'aval, réduction accompagnée par une augmentation de la taille des conduits. Il est donc théoriquement impossible d'introduire dans le réseau karstique (par un sondage par exemple) des matériaux d'une granulométrie telle qu'ils se coïncent plus à l'aval.

S'il y a circulation d'eau dans les conduits, il y aura entraînement : l'exemple de CHARMINE-MOUX illustre parfaitement ce mécanisme.

Le traitement du réseau karstique ne peut donc se faire normalement que par l'intermédiaire de matériaux fluides qui font prise une fois en place. Ce type de traitement implique l'absence de circulation d'eau dans les conduits en cours d'injection.

(1) *Dans les régions karstiques où les poljés sont cultivés, l'entretien des puits absorbants est un souci permanent pour les paysans afin d'éviter l'inondation.*

(2) *Le traitement des fuites des retenues par entraînement de produits de petite taille, de densité égale à 1, déversés dans l'eau et susceptibles d'être entraînés et de colmater les fuites, est actuellement étudié. Il s'agit d'une voie originale de recherche (Groupe de Travail du Comité Français des Grands Barrages, 1970).*

- Traitement "retenue vide"

Les multiples traitements réalisés ont permis de faire un nombre important de constatations :

- Efficacité des traitements dans la zone de transfert

Les voiles d'étanchéité sont en partie situés dans la zone de transfert. Il est donc nécessaire de traiter le mieux possible les conduits verticaux caractéristiques de cette zone, relativement peu nombreux, qui sont en liaison directe avec les réseaux de la zone profonde. Lorsqu'une galerie recoupe un tel conduit dans lequel on peut déverser directement un coulis approprié (fluidité, ...), l'expérience montre qu'il y a un cheminement rapide du coulis en profondeur et qu'il est nécessaire d'injecter une quantité importante de produits pour assurer le remplissage.

Exemple : Sur le site du barrage de SAINTE CROIX, en rive droite, un conduit de ce type a été recoupé à la cote 500 puis à la cote 490 par deux galeries. Le coulis déversé dans le conduit a réapparu par des fissures karstifiées, moins de deux heures après, à la cote 427 puis à la cote 395. La quantité de coulis nécessaire pour arriver à remplir la cavité a dépassé 95 m3.

Par contre, lorsque des vides de cette nature sont traités par forage, le traitement est souvent incomplet ainsi qu'on peut le constater si on recoupe ensuite ce conduit par une galerie.

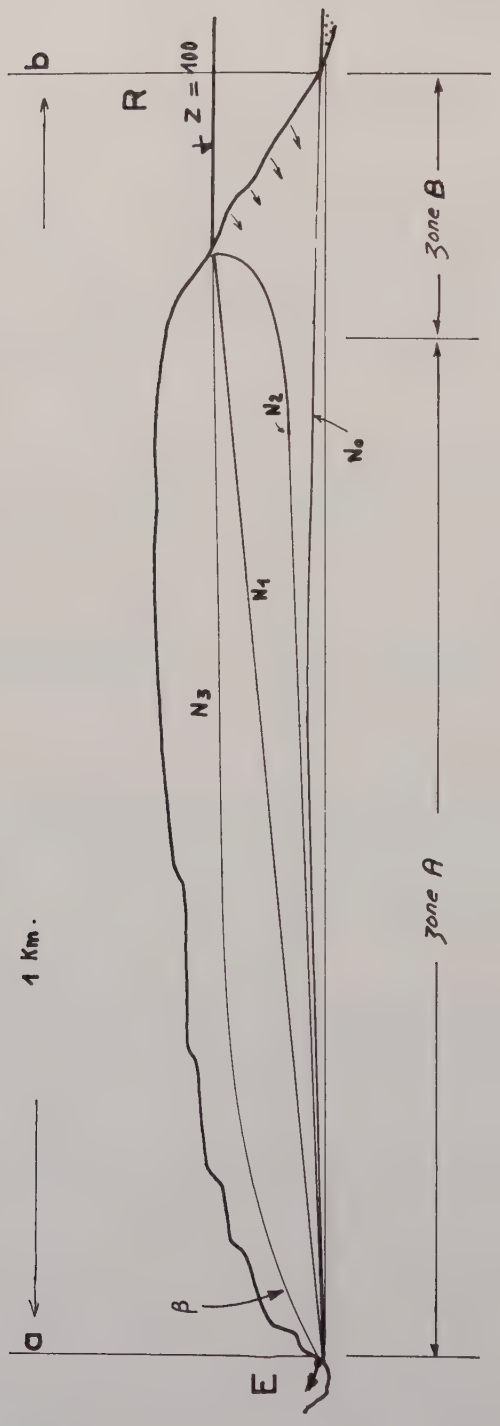
En raison de la difficulté de traiter les vides de ce type à partir des forages, il faut donc souligner l'intérêt qu'il y a à injecter directement ces conduits chaque fois que, à la faveur des travaux, l'occasion s'en présentera.

- Cheminement des coulis

A GREOUX, des ressorties de coulis ont pu être observées à plus de 200 m du forage d'injection, mettant en évidence les possibilités de circulation lointaine des coulis. Dans ce cas, la difficulté a été de trouver un accélérateur de prise limitant la distance parcourue par le coulis avant sa prise.

A CHARMINE-MOUX, les injections (de longue durée) ont permis un cheminement à longue distance des coulis (ressorties lointaines des produits). L'injection a été faite en plusieurs phases séparées par des mises en eau partielles destinées à tester l'efficacité du traitement. Les premières phases d'injection ont été suivies par une accélération progressive de la vitesse de l'eau dans le terrain. La poursuite de l'injection a finalement permis la disparition totale des fuites.

Le même phénomène d'accélération des vitesses de l'eau après injection a été observé à SAINTE CROIX (traitement expérimental de la rive droite). L'essai a été arrêté avant que l'on arrive à réduire les circulations souterraines.



Hypothèses sur la piézométrie du massif calcaire après mise en eau de la retenue.

On peut interpréter ce phénomène comme un "lissage" du cheminement karstique, correspondant à un colmatage des vasques, des vides, etc. Il s'agit du phénomène inverse de celui décrit sous le nom "d'effet de vasques" dans la première partie.

• Traitement des conduits colmatés

Dans les conduits karstiques colmatés (conduits horizontaux), le coulis injecté se localise en général en calotte, entre l'argile de remplissage et la voûte du conduit. Cette observation confirme l'absence ou tout au moins la qualité médiocre du remplissage au plafond des conduits (voir 1ère partie : chapitre 5, paragraphe 6).

En présence de vides karstiques colmatés, on observe également (si la pression est suffisante) le "claquage" de la masse argileuse et l'injection de coulis au coeur de l'argile (GREOUX, SAINTE CROIX).

4 - PIEZOMETRIE DANS LE MASSIF CALCAIRE, APRES REMPLISSAGE

Le schéma (fig. 7) représente une coupe verticale dans un massif calcaire karstique, entre une retenue (R) et une zone de résurgence probable (E) ; supposons AB = 1 km (1).

Avant la mise en eau, le drainage karstique naturel du massif aboutit à l'établissement d'une nappe de fissures (N_0) alimentée par les pluies. Cette nappe a une pente moyenne voisine de 5 ‰. La création d'une retenue (R) crée un plan d'eau s'élevant à la cote Z = +100 m par exemple.

Après une période de temps variable (ordre de grandeur 3 mois d'après les expériences réalisées à SAINTE CROIX par exemple), une nouvelle piézométrie s'établit dans le massif.

Remarque :

Il faut préciser que ce nouvel "équilibre" hydrogéologique correspond à une adaptation des écoulements souterrains au réseau de fissures existant au moment de la mise en eau dans les zones qui étaient jusqu'à ce jour hors d'eau. La progression de l'eau dans le massif peut être facilement suivie par les mesures piézométriques. Dans les cas étudiés, la variation des niveaux piézométriques peut atteindre plusieurs cm par jour. L'évolution se poursuit jusqu'à ce que l'on arrive à un équilibre hydrodynamique. Si le massif était constitué par un matériau inattaquable chimiquement et mécaniquement, cet équilibre serait définitif. Mais dans la mesure où le massif est vulnérable, débute alors une phase d'évolution beaucoup plus lente.

(1) *Ce schéma est inspiré de la structure réelle de la rive droite du site du barrage de SAINTE CROIX (chapitre 17, 2ème partie) ; la résurgence est constituée par une source karstique.*

Si on considère ce nouvel équilibre hydrodynamique, plusieurs hypothèses peuvent être envisagées :

- hypothèse 1 (fig. 7) :

La ligne piézométrique est voisine de N1 ; sa pente est régulière ; dans le schéma étudié le gradient est voisin de 10 %.

Cette hypothèse de travail n'est vérifiée par aucune mesure ; on ne connaît pas de massif karstique calcaire où, naturellement ou artificiellement après travaux, l'écoulement des eaux souterraines s'effectue avec une perte de charge régulière voisine de 10 % (1).

- hypothèse 2 :

La piézométrie est voisine de N2 ; dans la zone A, elle reste voisine de la piézométrie ancienne. Le réseau n'évolue pas. La perte de charge s'effectue donc dans la zone β où le gradient atteint 100 % !

Si les débits ne sont pas négligeables et si l'eau n'a pas perdu toute agressivité, il y aura, dans cette zone β , érosions chimique et mécanique continues et évolution.

- hypothèse 3 :

La ligne piézométrique s'établit suivant N3 : dans la plus grande partie du massif, la cote piézométrique est voisine de la cote de la retenue. Dans la zone du massif proche de l'émergence, le rabattement s'effectue dans la zone fissurée décomprimée du versant, dans la mesure où les débits ne sont pas très importants ; dans le cas contraire, des émergences apparaissent jusqu'à une cote peu différente de celle de la retenue. La zone β est le siège d'une érosion intense (expérience de FONTAINE L'EVEQUE). On imagine facilement que, dans un tel cas, on puisse constater, avant d'arriver à l'équilibre hydrodynamique, une érosion régressive par lessivage et débourrage. Dans la zone β , le gradient est alors supérieur à 50 %.

Dans aucune des hypothèses envisagées, le nouvel "équilibre" hydrodynamique qui s'établit ne peut être considéré comme stable et correspondant à un état d'équilibre naturel.

En conclusion, dès que des circulations (fuites) apparaîtront dans le massif calcaire après le remplissage de la retenue, il existera dans le massif au moins une zone où les mécanismes d'érosion karstique seront actifs.

(1) *Le site de CAMARASA est pourtant dans ce cas, mais rappelons qu'il s'agit d'un massif dolomitique.*

Cette question, dont l'importance pratique est liée à la vitesse d'évolution du processus d'érosion qui s'amorce après la mise en eau de la retenue, est encore très mal connue (1) en particulier en raison des difficultés et du coût des mesures.

5 - CARACTERE ARTIFICIEL DES LACS DE BARRAGES EN PAYS KARSTIQUE

Il n'est pas possible, à notre connaissance, de citer des exemples de lacs naturels situés dans un contexte karstique, comparables par leur importance et leur situation aux lacs de barrages tels que ceux étudiés dans la 2ème partie. Par contre, il est possible de trouver en haute montagne en particulier, des lacs naturels de grande capacité dans un contexte cristallin ou volcanique.

Il est cependant prématuré de tirer une règle de cette constatation. Seule, en effet, une analyse statistique de la répartition des terrains calcaires par rapport aux zones d'action des agents morphogénétiques indispensables pour créer des lacs (érosion glaciaire, éboulement, etc.),permettrait d'évaluer l'importance des divers facteurs justifiant cette absence. A notre connaissance, des recherches de ce type n'ont pas été entreprises.

Cette absence paraît cependant suffisamment significative pour que l'on considère le lac de barrage en pays karstique comme un "paysage artificiel" ou "fabriqué".

• La notion de paysage artificiel n'est pas propre aux lacs de barrages en pays calcaire. Le terme peut être employé chaque fois que des travaux réalisés créent un paysage (au sens large) ou une morphologie dont on ne trouve pas d'exemple naturel.

Un talus vertical argileux de grande hauteur, par exemple, est une morphologie artificielle (et éphémère !).

• La notion de paysage artificiel doit être dissociée de la notion d'instabilité.

Quand on envisage des travaux complexes (création d'une retenue par exemple), l'absence de paysage ou de morphologie naturelle comparable au paysage envisagé peut être due à deux causes différentes :

a) absence du mécanisme morphogénétique.

Par exemple, une cavité souterraine dans le granite est un paysage artificiel mais n'est pas instable. Son inexistence dans la nature est liée à l'absence d'un mécanisme creusant des cavités souterraines dans de telles formations.

(1) *On peut cependant citer l'exemple du barrage de SERRE PONÇON où les mesures montrent depuis la mise en eau une montée lente des niveaux piézométriques dans le massif marno-calcaire autour de l'usine souterraine qui est située en rive gauche non loin des appuis du barrage.*

b) incompatibilité de deux caractères.

Dans l'exemple du talus d'argile vertical cité précédemment, il y a incompatibilité entre les propriétés physiques de l'argile et la verticalité.

Ce dernier exemple est un cas simple. Il peut être nécessaire de réunir plusieurs caractères pour voir apparaître l'incompatibilité :

Une série calcaire stratifiée avec des joints argilo-marneux peut affleurer en falaise si la composante du pendage, perpendiculaire au versant, est inférieure à 50° (côté du versant d'air). Par contre, si le 3ème caractère est défavorable (pendage supérieur à 50°), il y a incompatibilité entre les trois caractères, joints, pendage, falaise ; le paysage ne peut alors subsister.

Si le nombre de facteurs conditionnant l'incompatibilité est élevé, il est possible que, dans les zones où ces facteurs sont réunis, les actions morphogénétiques n'aient pas eu lieu pour faire la démonstration "a contrario" que cette morphologie était instable.

Ce bref développement est plus qu'une remarque : la notion de paysage artificiel stable ou instable, peut être en effet la base d'une méthode de travail. Quand on réalise des travaux tels que des retenues, la complexité du milieu naturel et les effets d'échelle permettent rarement de prévoir, par l'expérimentation sur échantillons ou par le calcul, toutes les conséquences de la perturbation qui sera apportée par les modifications du paysage.

Cette méthode de travail permet,dans le cas où elle montre que le projet crée un paysage comparable à un paysage naturel, de définir les conditions limites "empiriques" à ne pas dépasser pour ne pas faire apparaître de risques. Dans le cas contraire, il importe de rechercher les causes de l'absence de termes de comparaisons et d'en tirer des conclusions.

• En ce qui concerne les retenues de barrage en pays karstique, l'absence de paysages naturels comparables, les caractères de l'hydrogéologie naturelle du massif calcaire, les caractères de l'hydrogéologie résultant de la création des retenues, nous font conclure que la pérennité de certaines retenues n'est pas assurée.

Dans la mesure où il existe des fuites, le lac de retenue en pays karstique est donc un paysage artificiel instable.

°
° °

CHAPITRE

5

Conclusions générales

PLAN

1 - Points acquis

2 - Problèmes

3 - Etude de l'étanchéité d'une retenue en pays karstique

4 - Possibilités et limites des études

°
° °

RESUME

La distinction - retenue au fil de l'eau - retenue suspendue - est fondamentale. Les retenues en région dolomitique doivent être considérées comme un groupe particulier.

La fuite karstique emprunte un réseau préexistant; mais l'intensité de la karstification n'est pas, à elle seule, un critère permettant de juger de l'importance du risque de fuite. La nature des remplissages et l'existence de tapis en surface sont des éléments d'appréciation fondamentaux. La morphologie des vides est également un critère d'appréciation de l'importance du risque.

Enfin, les retenues doivent être considérées, dans certains cas, comme des paysages artificiels. Ce fait soulève des problèmes mal connus : temps nécessaires pour que les équilibres physiques et chimiques s'établissent, vitesse d'érosion...

L'étude des cas réels, dans l'ordre chronologique, montre le rôle prépondérant pris dans les études par l'hydrogéologie, depuis quelques années. Ces études hydrogéologiques nécessitent des moyens importants, quelque soit la capacité de la retenue; elles impliquent obligatoirement d'observer plusieurs cycles hydrologiques naturels. C'est pourquoi, les études devront au minimum durer 3 ans. Enfin, l'étude du karst et de la karstification ne doit pas être limitée aux zones proches des ouvrages mais aborder certains aspects de ces phénomènes à l'échelle régionale.

GENERAL CONCLUSIONS

SUMMARY

The distinction between "run-of-river" and "suspended" reservoirs is a basic one. Reservoirs in dolomite areas must be considered a special group.

Leakage of karstic origin flows in a pre-existing network. But the single karstification intensity criterion is not enough to assess the leakage risk. The type of pipe-filling and the existence of surface blankets are also basic factors. The morphology of the cavities is also a factor in estimating the probability of leakage.

In some cases, reservoirs must be considered as artificial land-forms. This raises problems about which little is known, such as the time required to carry out physical and chemical equilibrium, erosion rate, etc.

An examination of actual cases in chronological order reveals how hydrogeology has taken a major place in recent years. Hydrogeological investigations require major resources, whatever the size of the reservoir. They necessarily imply making records of several natural hydrological cycles. The research must continue for at least 3 years. Lastly, the study of karsts and karstification must not be confined to the zones near the dam but must also approach these problems on a regional scale.

Si l'on devait dégager le plus brièvement possible les principaux points acquis à travers les analyses et les bilans réalisés, il faudrait retenir les idées suivantes qui peuvent s'ordonner selon 4 thèmes :

1 - POINTS ACQUIS

• La séparation en deux groupes, retenues "au fil de l'eau" et retenues "suspendues", est fondamentale. Chacun de ces deux groupes pose des problèmes spécifiques. Les risques encourus sont également différents et surtout très difficiles à préciser pour les retenues appartenant au deuxième groupe.

• Les dolomies et les massifs dolomitiques possèdent des caractères originaux bien particuliers : malgré la difficulté de classer certaines retenues dans l'un ou l'autre groupe, il apparaît souhaitable de considérer les sites de retenues en terrain dolomitique comme un groupe bien à part. L'expérience acquise dans les régions calcaires ne peut être extrapolée aux dolomies qu'avec beaucoup de précautions. Par sa perméabilité de masse, le massif dolomitique pose d'une façon plus aiguë que le calcaire le problème des sous-pressions ; il est également plus vulnérable à l'érosion karstique (chimique et mécanique).

• Les fuites des retenues en pays calcaire (hormis les fuites à courte distance liées à la décompression des versants) empruntent des cheminements préexistants du réseau de drainage créé par les mécanismes de la karstification.

• L'intensité de la karstification n'est pas à elle seule un critère d'appréciation pour définir le risque de fuites. Les karsts anciens, lorsqu'ils sont colmatés, peuvent dans certaines conditions, se révéler parfaitement étanches d'une façon durable après la mise en eau. Les conditions de cette étanchéité en sont les suivantes :

- existence d'un colmatage par des apports à forte teneur d'argile, d'origine extérieure au karst ;
- présence, sur la surface calcaire, d'un tapis étanche continu mettant les calcaires à l'abri de l'infiltration des eaux météoriques.

• L'importance du risque de fuites lié à la présence des vides karstiques dépend de leur morphologie. Le "karst de joint" représente un risque de fuites à moyenne distance (1 à 2 km) plus important que le "karst de fissures" (en général verticales). Le traitement des joints karstifiés horizontaux est également plus difficile que celui des fissures verticales.

• Enfin, la retenue en pays karstique doit être considérée comme un paysage artificiel, dans la mesure où il n'est pas possible de trouver des exemples de lacs naturels dont l'importance et le contexte hydrogéologique soient comparables à ceux des lacs de retenues créés par les barrages.

2 - PROBLEMES

L'analyse du milieu karstique et les études comparatives des barrages en pays calcaire montrent que, parmi les problèmes posés par la création d'une retenue dans un tel contexte, plusieurs ne sont pas encore résolus. Les derniers sont tous liés au fait que la création d'un lac de retenue en pays karstique conduit à un paysage artificiel.

Dans tous les cas, même en l'absence de fuites, la retenue artificielle est un élément nouveau de l'hydrogéologie régionale ou locale. Le nouvel équilibre hydrogéologique régional qui tend à s'établir est difficilement prévisible et maîtrisable.

- La durée nécessaire pour atteindre ce nouvel équilibre (surface piézométrique stabilisée et équilibre chimique des eaux) est inconnue : il faut au moins quelques mois pour stabiliser la piézométrie et vraisemblablement plusieurs années (au minimum) pour rééquilibrer la composition chimique de l'eau.

- En présence de fuites, dans certains contextes géologiques, on peut mettre en doute la possibilité d'aboutir sans travaux d'étanchement, à un nouvel équilibre hydrogéologique (1).

- Ce dernier aspect pose le problème de l'évolution des fuites karstiques à l'échelle de la vie des ouvrages. Nous avons vu que, quelle que soit la répartition des gradients, l'équilibre hydrogéologique qui s'établit après la mise en eau en présence de fuites implique l'existence dans le massif rocheux de zones où l'érosion karstique est active. Selon la vitesse du processus amorcé, il existe ou non un problème pratique.

3 - ETUDE DE L'ETANCHEITE D'UNE RETENUE EN PAYS KARSTIQUE

- Evolution des études : La présentation des retenues dans l'ordre chronologique de leur réalisation a mis en évidence la place de plus en plus importante prise par l'hydrogéologie dans les études de ces retenues.

Si pour les ouvrages les plus anciens, les reconnaissances restent localisées à proximité de l'ouvrage, pour les plus récents (CEYRAC, KARAOUN, SAINTE CROIX), les moyens engagés pour les études hydrogéologiques sont considérables et l'étude aborde dans certains cas le problème à l'échelle régionale.

(1) *Dans certains cas, il est économiquement possible d'envisager un entretien périodique du terrain, par injection par exemple, pour stabiliser les niveaux piézométriques à des cotes acceptables.*

Les remarques des pages précédentes montrent également que l'étude de l'étanchéité d'une retenue en pays karstique ne doit pas être dissociée d'une étude prévisionnelle du futur équilibre hydrogéologique qui résultera de la mise en eau de la retenue (1).

● Méthodes et techniques d'étude : L'évaluation du risque de non-étanchéité d'une cuvette et de la possibilité d'un traitement éventuel nécessite une connaissance approfondie de l'hydrogéologie et de la karstification, en raison de la nature même de la fuite karstique.

On ne saurait trop insister sur le fait que l'étude hydrogéologique doit être précédée puis accompagnée par une étude hydrologique détaillée. L'étude hydrogéologique (voir 1ère partie : chapitre 3) apporte des renseignements sur le karst actif. L'étude du karst permet dans une certaine mesure d'estimer l'incidence du karst hors d'eau sur le remplissage de la retenue.

°
° °

Le bilan des études réalisées ces dernières années permet de proposer un choix dans les méthodes et les techniques possibles et de porter un jugement sur les techniques actuellement utilisées (2).

D'une manière générale, peu de techniques nouvelles sont apparues ces dernières années ; aucune ne s'est imposée comme une technique adaptée à l'échelle des phénomènes karstiques.

● L'étude hydrogéologique

Elle doit avoir pour but de définir les mécanismes du drainage souterrain du massif.

Pour y parvenir, il est nécessaire de connaître quantitativement : le régime des apports naturels, le régime des restitutions, le niveau (cote) et la vitesse des transferts souterrains.

Ces quelques lignes paraissent une évidence, mais représentent en fait un programme ambitieux qui n'est que rarement réalisé.

(1) *Ce problème est aussi celui des ouvrages en zone alluviale.*

(2) *Cf. "réalisation des barrages et des retenues en pays karstique. Tendances françaises actuelles". Groupe de Travail du Comité Français des Grands Barrages animé par R. Thérond. 10e Congrès des Grands Barrages - MONTREAL 1970 - Q. 37 - R. 23.*

● L'étude du karst

Il faut garder présent à l'esprit que le karst n'est logique et ne s'ordonne qu'à l'échelle kilométrique. Seules les techniques adaptées à cette échelle fourniront donc des résultats significatifs.

● L'étude statistique régionale est indispensable pour poser correctement le problème. Quand les travaux de base (annuaires, recensements) n'existent pas, une exploration sommaire permet d'évaluer l'importance de la karstification. Mais dans ce cas, il y a dans certaines régions un risque de sous-évaluation, notamment lorsqu'il existe une forte couverture végétale ; le risque de surévaluation de l'importance de la karstification est beaucoup plus réduit.

● La morphologie du karst souterrain est généralement très homogène dans une région si les faciès lithologiques sont constants, comme cela est fréquent. Cette constatation fondamentale explique pourquoi les observations morphologiques faites à plusieurs kilomètres des zones suspectes peuvent le plus souvent être extrapolées à ces zones et souligne l'intérêt d'étudier le karst à l'échelle régionale.

● L'importance qu'il faut attacher à la nature et à l'origine des remplissages a été mise en évidence ; il importe donc d'arriver à une identification complète des matériaux de colmatage.

● Le rôle et l'importance des couvertures non-calcaires qui recouvrent dans certaines régions les massifs calcaires, ont été démontrés. La continuité, l'épaisseur et la nature de ces tapis doivent donc être étudiées avec le plus grand soin. Les rapports entre les matériaux de couverture et les remplissages karstiques doivent être également définis avec précision.

● Les moyens de reconnaissance

Les réseaux d'observation mis en place dans le cadre de l'étude hydrologique générale d'un projet ne permettent pas une étude hydrogéologique suffisamment détaillée pour arriver à une compréhension correcte de l'ensemble des phénomènes karstiques.

● Toutes les sources doivent être inventoriées et équipées d'un dispositif de jaugeage ; les plus importantes, soit par leur débit, soit par leur situation par rapport à l'ouvrage, doivent bénéficier d'un dispositif enregistreur en continu.

● La qualité de l'étude de la nappe de fissures dépend essentiellement du nombre des piézomètres et de la valeur des mesures. Il faut insister sur la densité de piézomètres nécessaire pour arriver à dessiner une véritable nappe de fissures. Le chiffre de 2 à 4 piézomètres au km2 peut être retenu. La mesure manuelle, même biquotidienne, est insuffisante et inadaptée à la brutalité de la crue karstique. Aussi, un piézomètre sur 3 doit-il être muni d'un enregistreur continu.

● Enfin, pour arriver à des corrélations instructives, la pluviométrie doit être suivie à l'aide de pluviographes et de pluviomètres. Dans les zones suspectes où sont implantés les piézomètres, la densité nécessaire doit être voisine d'un pluviographe pour 2 km2.

Le nombre de pluviomètres à installer est fonction de la topographie. Par exemple, pour l'étude d'un bassin de retenue en zone montagneuse (30 km2 de bassin versant), le dispositif qui s'est avéré nécessaire pour analyser correctement le régime des pluies est le suivant : 2 pluviographes, 3 pluviomètres totalisateurs (en raison de l'accès difficile en hiver), soit en moyenne 1 appareil pour 6 km2.

• L'étude du karst relève dans une première phase de l'observation directe des indices de surface et de l'étude des cavités. Seules cependant les coupes artificielles au rocher permettent de faire certaines observations. Dans les zones suspectes à proximité de l'ouvrage, la galerie de reconnaissance reste le moyen le plus efficace pour examiner le karst et mesurer les indices de vides.

Il faut au minimum 400 à 500 m de galeries pour porter un jugement valable sur la karstification d'un massif rocheux. Ces galeries ne doivent pas rester à proximité de la surface (karst de versant) ; seules des galeries profondes permettent de juger de la nature et de l'intensité du karst au-delà des zones décomprimées.

• Les résultats des sondages carottés conduisent le plus souvent à sous-estimer la karstification, en particulier dans les séries horizontales où les karsts de joints sont prédominants.

• Quant aux méthodes électriques ou sismiques, il faut dire avec franchise qu'elles n'ont pu jusqu'à ce jour, quelle que soit la qualité de l'expérimentation, apporter des résultats utilisables dans l'étude générale de l'étanchéité des retenues.

• On peut cependant espérer que les progrès réalisés dans les domaines de la prospection par infra-rouge et par gravimétrie pourront dans un avenir prochain apporter des moyens de reconnaissance adaptés à l'échelle des phénomènes karstiques.

• Durée des études

L'étude de l'étanchéité d'une retenue exige un temps minimum, quelle que soit l'importance des moyens mis en oeuvre. Elle comporte en effet l'observation de phénomènes naturels cycliques et saisonniers.

Cette durée est de 3 ans environ. Il faut en effet au minimum deux cycles hydrologiques complets d'observation, précédés d'une période de 6 mois, indispensable pour faire les études de base (géologie, prospection karstique) et pour définir et installer les dispositifs d'auscultation hydrogéologique.

Il faut également rappeler que les expériences de coloration, seul moyen pour définir les relations - perte, résurgence - et pour calculer les vitesses des circulations souterraines, doivent être échelonnées dans le temps pour éviter les confusions en raison du petit nombre de colorants pratiques disponibles.

4 - POSSIBILITES ET LIMITES DES ETUDES

Les techniques d'étude de traitement étant ce qu'elles sont, avec quelle précision peut-on aujourd'hui définir l'importance du risque karstique ?

• Tout d'abord, il faut affirmer nettement que l'étanchéité ou la non-étanchéité d'une retenue en pays calcaire ne relève pas du simple hasard. Une étude sérieuse permet dans la plupart des cas, dans un délai de 3 à 4 ans, de réduire le nombre des inconnues : la localisation, la vitesse des circulations, l'évolution des fuites peuvent être en partie prévues. Malheureusement, une des données les plus difficiles à évaluer est l'importance des débits de fuites.

• Il faut bien préciser que dans la grande majorité des cas, l'étanchéité d'un massif calcaire karstique ne se démontre pas. Ce qui peut être éventuellement démontré, c'est que la mise en eau s'accompagnera de fuites ; autrement dit, sauf exception, l'avis le plus favorable qui pourra être donné sur un massif calcaire karstique sera que les études n'ont mis en évidence aucun fait qui permette d'affirmer qu'il y aura fuite à la mise en eau.

• Il faut également savoir que, lorsqu'on a atteint un certain niveau de connaissances, on ne pourra pratiquement plus réduire la marge d'incertitude, quelles que soient les reconnaissances complémentaires engagées. L'efficacité consistera donc à atteindre aux moindres frais ce niveau de connaissances.

Ce stade atteint, les seuls objectifs valables des études doivent être les suivants :

1) mise en place d'un dispositif permettant l'auscultation lors de la mise en eau ; cette dernière doit toujours être considérée comme un test essentiel, permettant en particulier de préciser au maximum la localisation des zones où une intervention s'avérerait nécessaire.
2) définition des techniques et estimation des coûts des travaux d'étanchement.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN
Publications scientifiques et littéraires
TYPO - OFFSET
05002 GAP - Téléphone 51-35-23 +
Dépôt légal 83 - 1973